

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

«Автоматизація процесу кристалізації металу на МНЛЗ з розробкою системи візуалізації»

Виконав ст. гр. АКІТР-24-1м. _____ Квашук А. О.

Керівник _____ Рубан С. А.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м. Квашуку Артему Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація процесу кристалізації металу на МНЛЗ з розробкою системи візуалізації»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 74с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (18 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Рубан С. А

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	10.02.25
2	<i>Розділ 1</i>	15.04.25
3	<i>Розділ 2</i>	18.07.25
4	<i>Висновки</i>	20.11.25
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	25.11.25
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	28.11.25
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	01.12.25

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ /Рубан С. А./

7. Запевнення: Я, Квашук Артем Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Квашук А. О./

АНОТАЦІЯ

Квашук А. О. «Автоматизація процесу кристалізації металу на МНЛЗ з розробкою системи візуалізації».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою «Киберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті» зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2025.

Об'єктом дослідження є процес кристалізації металу на машині неперервного лиття заготовок (МНЛЗ) та розробка системи візуалізації цього процесу з використанням сучасних засобів автоматизації.

У першому розділі проведено аналіз технологічного процесу кристалізації металу, розглянуто особливості безперервного лиття заготовок, сучасні рішення автоматизованих систем керування, а також проаналізовано можливості впровадження технологій Industry 4.0 у металургійному виробництві.

У другому розділі розроблено архітектуру кібер-фізичної системи керування процесом кристалізації, обґрунтовано вибір програмного забезпечення (PLCnext Engineer, AVEVA InTouch SCADA) та наведено програмно-технічну реалізацію проєктованих компонентів інтелектуального виробництва. Представлено алгоритми обробки даних, структуру змінних, принципи інтеграції через OPC UA, а також реалізовано систему моніторингу параметрів процесу в реальному часі.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, МНЛЗ, PLCnext, SCADA, OPC UA, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

ANNOTATION

Kvashuk A. O. "Automation of the metal crystallization process on a caster with the development of a visualization system".

Graduation master`s work for obtaining an educational degree «Master» for the educational and professional program "Cyber-physical systems in industry, business and transport" in specialty 174 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2025.

The purpose of the work is the process of metal crystallization on a continuous casting machine (CCM) and the development of a visualization system for this process using modern automation tools.

The first section is about the technological process of metal crystallization is analyzed, the features of continuous casting of billets are considered, modern solutions of automated control systems are analyzed, and the possibilities of implementing Industry 4.0 technologies in metallurgical production are analyzed.

The second section is about the architecture of the cyber-physical system for controlling the crystallization process is developed, the choice of software (PLCnext Engineer, AVEVA InTouch SCADA) is justified, and the software and hardware implementation of the designed components of intelligent production is presented. Data processing algorithms, the structure of variables, the principles of integration via OPC UA are presented, and a real-time process parameter monitoring system is implemented.

Keywords:

AUTOMATIZATION, VISUALIZATION, CRYSTALLIZATION, CCM, PLCnext, SCADA, OPC UA, CONTROL SYSTEM.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	9
1.1 Аналіз технологічного процесу та огляд існуючих рішень інтегрованих автоматизованих систем управління виробництвом.....	9
1.2. Аналіз можливостей застосування технологій Industry 4.0 для інтелектуалізації виробництва.....	17
1.3 Аналіз вітчизняних досліджень.....	20
1.4 Аналіз зарубіжних досліджень.....	28
1.5 Визначення патенту.....	32
1.6 Аналіз патенту №UA95200C2.....	33
1.7 Аналіз патенту №UA110573C2.....	34
1.8 Аналіз патенту №UA123456C2.....	35
1.9 Аналіз патенту №UA125356U.....	36
1.10 Аналіз патенту №UA142035U.....	36
РОЗДІЛ 2 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	39
2.1 Проектування загальної архітектури системи на базі еталонних архітектур Industry 4.0.....	39
2.2. Обґрунтування вибору програмного забезпечення для реалізації системи.....	43
2.3. Розробка схеми мережних інформаційних потоків інтегрованої автоматизованої системи.....	48
2.4. Програмно-технічна реалізація проєктованих компонентів інтелектуального виробництва та засобів їх інтеграції.....	53
2.5. Розробка основних анімованих сторінок для системи диспетчерського контролю та керування і сервісів аналітики.....	58
ВИСНОВКИ.....	69

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	71
-------------------------------------	----

ВСТУП

Робота присвячена дослідженню процесу кристалізації металу на машині неперервного лиття заготовок (МНЛЗ) з розробкою системи візуалізації цього процесу. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності та якості металургійного виробництва шляхом удосконалення контролю та аналізу процесів кристалізації, що є ключовим етапом у формуванні структури металу.

Мета роботи полягає у вивченні особливостей процесу кристалізації металу на МНЛЗ, аналізі факторів, що впливають на якість литої заготовки, та розробці системи візуалізації, яка дозволить наочно відображати динаміку кристалізації для подальшого моніторингу та оптимізації технологічного процесу.

Сутність вирішуваної задачі полягає в розробці програмного забезпечення для моделювання та візуалізації процесу кристалізації металу, що забезпечить інтуїтивно зрозуміле представлення даних про теплові, фізичні та структурні зміни в металі під час лиття. Реалізація системи візуалізації сприятиме оперативному виявленню відхилень у процесі, підвищенню якості заготовок та зниженню виробничих дефектів.

У роботі розглядаються теоретичні основи кристалізації, аналізуються сучасні методи візуалізації даних, а також пропонується практичне рішення у вигляді програмного продукту, який може бути використаний у металургійній промисловості.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Аналіз технологічного процесу та огляд існуючих рішень інтегрованих автоматизованих систем управління виробництвом.

Процес кристалізації металу на машині безперервного лиття заготовок (МНЛЗ) є одним із ключових етапів металургійного виробництва, що визначає якість і властивості готової продукції. Технологічний процес включає кілька основних стадій: подача розплавленого металу в кристалізатор, охолодження металу в зоні первинного затвердіння, формування твердої оболонки заготовки та подальше охолодження в зоні вторинного охолодження. Кристалізація залежить від таких параметрів, як температура розплаву, швидкість витягування заготовки, інтенсивність охолодження, склад сталі та геометрія кристалізатора.

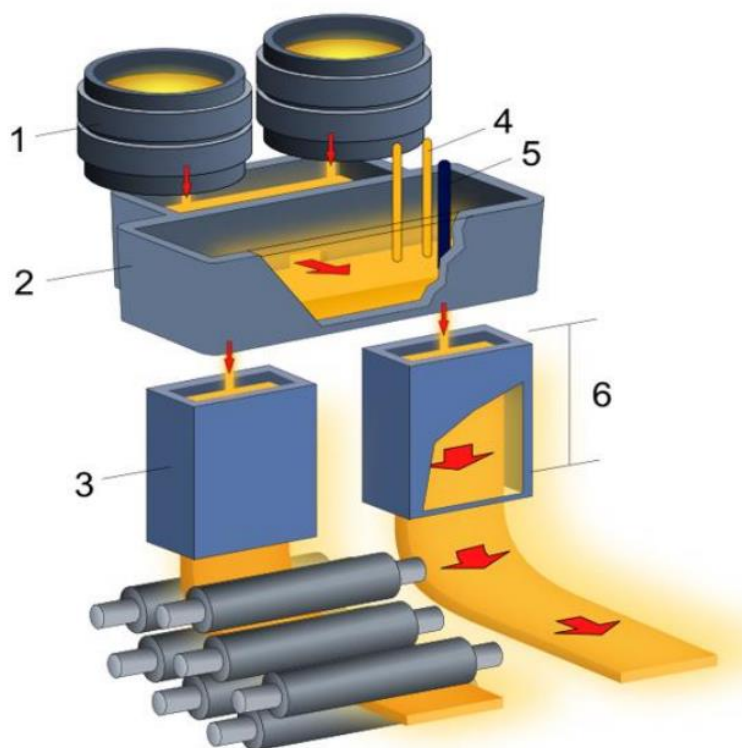


Рисунок. 1.1 - схема безперервного розливання сталі

На рисунку 1.1 прийняті наступні позначення: 1 - сталерозливна посудина (ківш); 2 - проміжний ківш; 3 - мідний кристалізатор; 4 - нагрівальний пристрій для

підтримки температури; 5 - стопор; 6 - зона первинного охолодження і початку кристалізації.

Перед початком процесу безперервного лиття заготовок, проводять ретельну перевірку та налаштування всього контрольно-вимірювального обладнання. Це потрібно для забезпечення точності та стабільності технологічного процесу. Далі, в кристалізатор, який є основною частиною МНЛЗ поміщають спеціальну затравку. Її поперечний переріз ідентичний перерізу майбутньої заготовки. Затравка відіграє роль своєрідного дна, на яке надходять перші порції розплавленого металу.

Наступним етапом є подача рідкої сталі з сталерозливного ковша безпосередньо у верхню частину кристалізатора. Кристалізатор інтенсивно охолоджується водою, що циркулює у його стінках. Під час безперервного надходження рідкого металу, відбувається поступове формування злитка. Щоб поліпшити якість поверхні заготовки та забезпечити стабільність процесу кристалізації, рівень рідкого металу в кристалізаторі постійно контролюється та підтримується на заданому рівні.

У зоні контакту рідкої сталі зі стінками кристалізатора утворюється тонка первинна скоринка. Вона запобігає витіканню рідкого металу з кристалізатора. Для покращення формування цієї скоринки та запобігання її прилипанню до стінок, кристалізатору надають зворотно-поступальні рухи з певною амплітудою. Це сприяє більш рівномірному охолодженню та формуванню якісної поверхні заготовки.

Після того, як заготовка набуває потрібної форми, вона безперервно витягується з кристалізатора за допомогою системи роликів. Ролики швидко транспортують її до зони вторинного охолодження. У цій зоні, за допомогою спеціальних форсунок, здійснюється інтенсивне поверхневе охолодження заготовки водою або водоповітряною сумішшю. В результаті цього, заготовка поступово твердне по всьому перерізу.

Така технологія дозволяє отримувати заготовки практично необмеженої довжини. Водночас, зменшуються втрати металу (приблизно на 20-30%) за рахунок мінімізації обрізків на кінцях заготовок. Безперервне лиття сталі сприяє досягненню однорідної структури металу по всій довжині злитка.

Процес називається неперервним, оскільки заміна сталерозливних ковшів (ємністю до 350 тонн металу) відбувається практично без зупинки процесу. Це забезпечується поворотним стендом машини неперервного лиття заготовок (МНЛЗ), який розвертає положення розливки на 180 градусів. За одну плавку виготовляється, як правило, 8-15 слябів. Продуктивність сучасних МНЛЗ дозволяє виконувати 38-40 таких плавок на добу.

Кристалізатор - це мідна посудина, що має порожнину всередині та певну геометричну форму, але без дна. Він є ключовим елементом установок, які використовують для перетворення розплавлених матеріалів на тверді вироби потрібної форми. Процес затвердіння тут відбувається шляхом охолодження розплаву до температури, при якій починається кристалізація.

У машинах неперервного лиття заготовок (МНЛЗ) кристалізатор виконує роль теплообмінника. Його основна функція - інтенсивне відведення тепла від сталі, яка проходить через нього. Розглянемо приклад промислового кристалізатора слябової МНЛЗ. У такий пристрій сталь подається спеціальним розливним ковшем.

Коли розплавлений метал контактує з поверхнею кристалізатора, в зоні контакту миттєво починає формуватися тверда кірка. Це стається завдяки охолодженню металу. Мідь, з якої виготовлений кристалізатор, має високу теплопровідність, що активно сприяє цьому процесу.

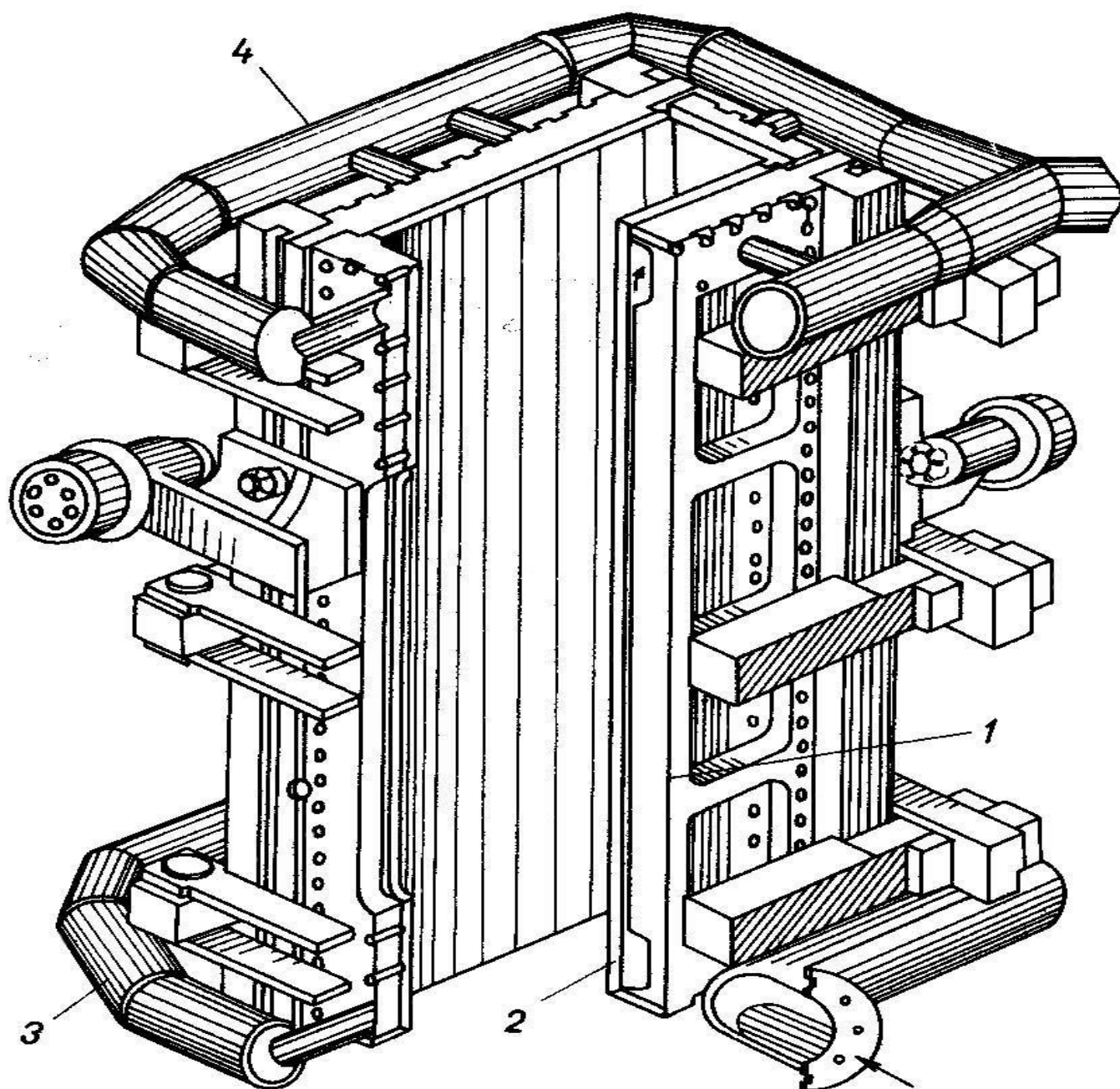


Рисунок 1.2- кристалізатор на МНЛЗ

На рисунку 1.2 прийняті наступні позначення: 1 - сталевий кожух; 2 - внутрішня мідна стінка; 3 - підвід води; 4 - відвід води.

Однак, у процесі утворення твердої кірки існує ризик прилипання металу до поверхні кристалізатора. Це може негативно позначитися на якості кінцевої продукції, оскільки в кірці виникають напруження розтягу. Ці напруження виникають під час витягування заготовки з кристалізатора і можуть призвести до дефектів у структурі металу. Тому, для забезпечення високої якості сталі, важливо

ретельно контролювати процес кристалізації та запобігати прилипанню металу до стінок кристалізатора.

Враховуючи все вище написане відокремлюємо три основні виклики процесу, а саме:

Контроль температурного режиму, нерівномірне охолодження металу може призвести до виникнення тріщин, пор та інших дефектів у структурі матеріалу. Це, своєю чергою, негативно впливає на механічні властивості та термін служби виробу. Щоб запобігти цьому, необхідно забезпечити стабільне та рівномірне відведення тепла від заготовки по всій її поверхні.

Другою важливою проблемою є управління швидкістю лиття. Відхилення від встановлених оптимальних значень може викликати серйозні дефекти, такі як відшарування зовнішньої оболонки заготовки або, ще гірше, прорив рідкого металу. Ці проблеми вимагають точного контролю швидкості подачі металу та швидкості його затвердіння.

Наступним аспектом є моніторинг якості заготовки. Важливо оперативно виявляти будь-які дефекти, що виникають в процесі лиття, такі як внутрішні напруги або неоднорідність структури. Внутрішні напруги можуть призвести до деформації виробу під час подальшої обробки, а неоднорідність структури - до непередбачуваної поведінки матеріалу в експлуатації. Для цього потрібне використання сучасних методів неруйнівного контролю, здатних виявляти дефекти на ранніх стадіях.

Вирішення цих проблем потребує впровадження автоматизованих систем управління процесом лиття. Такі системи повинні забезпечувати збір, обробку та аналіз даних у режимі реального часу. Це дозволяє оперативно реагувати на будь-які відхилення від заданих параметрів, своєчасно коригувати процес лиття, мінімізувати утворення дефектів і, як наслідок, підвищувати якість готової продукції. Автоматизація також зменшує вплив людського фактора та забезпечує стабільність процесу лиття. Важливим є не тільки впровадження автоматизованих

систем, але й їхнє правильне налаштування та періодичне обслуговування для забезпечення їхньої стабільної роботи.

У сучасній металургійній промисловості, де точність і ефективність є критично важливими, інтегровані автоматизовані системи управління виробництвом (АСУВ) відіграють ключову роль. Ці системи, побудовані на основі принципів цифровізації, дозволяють здійснювати моніторинг, контроль та оптимізацію виробничих процесів у реальному часі. В основі їх роботи лежить використання різноманітних датчиків, які збирають дані про ключові параметри, а також складного програмного забезпечення для обробки інформації та систем візуалізації, що полегшують сприйняття та аналіз даних.

Серед основних типів рішень, які застосовуються для управління МНЛЗ можна виділити наступні:

Системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Системи SCADA призначені для моніторингу та керування технологічними параметрами в режимі реального часу. Вони дозволяють операторам отримувати оперативну інформацію про стан обладнання та процеси, а також вносити необхідні корективи для підтримки оптимального режиму роботи. Серед популярних SCADA-систем можна назвати Siemens WinCC та AVEVA InTouch SCADA. Ці системи широко використовуються на металургійних підприємствах завдяки їх надійності та функціональності. Системи SCADA легко інтегруються з різноманітними датчиками, які вимірюють температуру, тиск, швидкість та інші важливі параметри процесу. Вони відображають дані у вигляді графіків, діаграм і трендів, що полегшує їх аналіз. Крім того, SCADA-системи дозволяють автоматизувати багато рутинних операцій, підвищуючи тим самим продуктивність праці. Одним із недоліків SCADA-систем є їх відносна обмеженість у гнучкості налаштування специфічних моделей процесу. Хоча вони добре підходять для моніторингу та керування основними параметрами, їх можливості моделювання складних фізичних явищ можуть бути недостатніми.

Системи MES (Manufacturing Execution Systems). Системи MES призначені для управління виробничими процесами на рівні цеху. Вони охоплюють широкий спектр завдань, включаючи планування виробництва, контроль якості продукції, управління матеріальними потоками та оптимізацію використання обладнання. Відомими прикладами MES-систем є SAP Manufacturing Execution та GE Proficy. Ці системи інтегруються з іншими корпоративними системами, такими як ERP, для забезпечення узгодженості даних та координації діяльності різних підрозділів підприємства. Системи MES мають тісну інтеграцію з ERP-системами, що дозволяє обмінюватися даними про замовлення, запаси, виробничі плани та інші важливі параметри. Вони також здатні аналізувати великі обсяги даних, виявляти закономірності та тенденції, що допомагає приймати обґрунтовані управлінські рішення. Одним із недоліків MES-систем є їх складність адаптації до специфічних вимог МНЛЗ. Оскільки вони орієнтовані на управління загальними виробничими процесами, їх функціональність може бути надмірною або недостатньою для вирішення конкретних завдань, пов'язаних з кристалізацією металу.

Існують також і спеціалізовані системи які призначенні саме для моделювання фізичних процесів. Серед популярних систем моделювання та візуалізації можна назвати ANSYS Fluent та COMSOL Multiphysics. Ці системи використовують чисельні методи для розв'язання рівнянь математичної фізики, що описують теплові, гідравлічні та механічні процеси в МНЛЗ. Спеціалізовані системи моделювання дозволяють досягти високої точності моделювання імітуючи поведінку рідкого металу в процесі кристалізації. Це дозволяє здійснювати прогнозування дефектів, таких як утворення тріщин, пористості та сегрегацій, та вживати заходів для їх запобігання.

Використання спеціалізованих систем моделювання потребує участі висококваліфікованих спеціалістів, які володіють знаннями в галузі математичного моделювання, теплофізики та металургії. Крім того, для проведення складних розрахунків потрібні значні обчислювальні ресурси, що може обмежувати їх застосування в реальному часі. Важливо відмітити, що інтеграція з системами

реального часу може бути обмежена, що уповільнює процеси автоматизації та управління.

Промислові IoT-платформи призначені для збору даних із датчиків через мережу IoT, їх аналізу та використання для оптимізації виробничих процесів. Вони дозволяють створювати розподілені системи моніторингу та управління, які охоплюють велику кількість обладнання та територіально рознесені об'єкти. Прикладами промислових IoT-платформ є PTC ThingWorx та Microsoft Azure IoT. Ці платформи надають широкий набір інструментів для розробки та підтримки IoT-рішень, включаючи засоби збору, зберігання, обробки та візуалізації даних. IoT-платформи є масштабованими, що дозволяє легко розширювати систему моніторингу та управління при збільшенні кількості обладнання або розширенні виробничих площ. Вони підтримують хмарні технології, що забезпечує гнучкість та економічність при розгортанні та експлуатації системи. Однією з важливих переваг є інтеграція з машинним навчанням, яке дозволяє виявляти складні закономірності в даних та використовувати їх для прогнозування та оптимізації процесів. Основним недоліком IoT-платформ є залежність від стабільного інтернет-з'єднання. У випадку перебоїв у зв'язку можлива втрата даних та порушення роботи системи. Крім того, існують проблеми з кібербезпекою, оскільки IoT-пристрої можуть бути вразливими до атак зловмисників.

Сучасні промислові платформи інтернету речей (IoT) підтримують обчислення на периферії. Це дає змогу виконувати частину розрахунків безпосередньо на пристроях біля обладнання. Так можна зменшити залежність від хмарних сервісів і скоротити час затримки до 5-20 мілісекунд. Це важливо для задач, що потребують швидкої реакції, наприклад, для передбачення проривів на машині безперервного лиття заготовок або для динамічного керування процесами.

1.2. Аналіз можливостей застосування технологій Industry 4.0 для інтелектуалізації виробництва.

Четверта промислова революція, відома як Industry 4.0, ґрунтується на інтеграції ряду провідних цифрових технологій. До них належать Інтернет речей (IoT), Big Data, штучний інтелект (ШІ), хмарні обчислення та кіберфізичні системи. Ця інтеграція спрямована на створення інтелектуальних виробничих процесів, що характеризуються підвищеною ефективністю та адаптивністю.

У металургійній промисловості, особливо в процесі лиття металу на машинах неперервного лиття заготовок (МНЛЗ), технології Industry 4.0 пропонують значні перспективи. Вони можуть бути використані для підвищення ефективності виробництва, мінімізації дефектів продукції та оптимізації технологічних параметрів у режимі реального часу. Традиційний підхід до управління виробництвом часто є реактивним, тобто реагує на проблеми після їх виникнення. Натомість, застосування технологій Industry 4.0 дозволяє перейти до проактивного, навіть передбачуваного управління. Система здатна самостійно аналізувати дані, прогнозувати потенційні проблеми і пропонувати найбільш підходящі рішення ще до їх прояву. Це особливо цінно для МНЛЗ, де процес кристалізації є досить складним і залежить від багатьох факторів, таких як температура, швидкість лиття та інтенсивність охолодження.

Розглянемо більш детально можливості, які надають технології Industry 4.0 для інтелектуалізації виробничих процесів у металургії:

Інтернет речей (IoT). Використання IoT передбачає встановлення численних датчиків у різних точках МНЛЗ, зокрема на кристалізаторі, у зоні вторинного охолодження та інших важливих вузлах. Ці датчики збирають дані про широкий спектр параметрів, включаючи температуру, та швидкість витягування заготовки. Переваги такого моніторингу в режимі реального часу очевидні: він дозволяє оперативно виявляти будь-які відхилення від норми, такі як нерівномірне

охолодження або ризик прориву металу. Важливо, що IoT-платформи здатні об'єднувати дані з різних джерел, формуючи єдину інформаційну систему, що відображає стан процесу. Наприклад, IoT-система може передавати дані на хмарну платформу для подальшого аналізу. Це дозволяє оператору бачити динаміку процесу в зручному та зрозумілому інтерфейсі, що полегшує прийняття обґрунтованих рішень.

Big Data та аналітика. У процесі кристалізації металу важливим є аналіз великих обсягів даних, як історичних, так і поточних. Це дозволяє виявляти закономірності і зв'язки між різними параметрами процесу і якістю кінцевої продукції. Наприклад, можна встановити залежність якості заготовки від конкретних параметрів лиття. Аналізуючи ці дані, можна прогнозувати можливість виникнення дефектів, таких як тріщини або пори, на основі статистичних моделей. Крім того, з'являється можливість оптимізувати режими роботи МНЛЗ для зниження енергозатрат і підвищення якості продукції. Наприклад, системи Big Data можуть виявити, що певна комбінація температури розплаву і швидкості витягування дозволяє зменшити ймовірність виникнення внутрішніх напружень у заготовці.

Штучний інтелект (ШІ) і машинне навчання (ML). ШІ може використовуватися для прогнозування поведінки металу під час процесу кристалізації. На основі цих прогнозів система здатна автоматично коригувати різні параметри, наприклад, інтенсивність охолодження. Алгоритми машинного навчання здатні навчатися на основі даних з попередніх циклів лиття. Це дозволяє їм постійно покращувати точність прогнозів і мінімізувати кількість дефектів. ШІ також може пропонувати оптимальні налаштування для різних марок сталі, враховуючи їхні унікальні властивості. Наприклад, нейронна мережа може аналізувати дані про температуру і швидкість в режимі реального часу і прогнозувати ризик утворення тріщин, дозволяючи операторам вжити превентивні заходи.

Хмарні обчислення. Хмарні обчислення забезпечують ефективне рішення для зберігання та обробки великих обсягів даних, що генеруються в процесі виробництва. Це дозволяє отримати доступ до аналітики і візуалізації даних з будь-якого пристрою, що значно підвищує гнучкість управління. Крім того, хмарні обчислення забезпечують масштабованість, що дозволяє збільшувати обчислювальні потужності в міру необхідності. Також знижуються витрати на локальну IT-інфраструктуру, оскільки велика частина обчислень відбувається у хмарі. Хмарні платформи можуть легко інтегруватися з іншими виробничими системами, такими як SCADA (системи диспетчерського управління і збору даних) і MES (системи управління виробництвом). Наприклад, хмарна платформа може надати оператору МНЛЗ доступ до інформаційної панелі з візуалізацією процесу кристалізації через звичайний веб-інтерфейс.

Цифрові двійники (Digital Twins). Цифровий двійник - це віртуальна модель МБЛЗ, яка в режимі реального часу відображає стан фізичного обладнання та хід процесу кристалізації. Це дозволяє моделювати різні сценарії, наприклад, зміну швидкості лиття, без ризику для реального виробництва.

Якщо говорити про впровадження цифрових двійників у металургійну галузь, то слід розуміти, що ця технологія дає змогу не просто створювати моделі процесів у часі наближеному до реального. Вона ще й дозволяє проводити віртуальні дослідження, змінюючи різні параметри, і при цьому не ризикувати пошкодити справжнє обладнання.

Візьмемо, наприклад, машину безперервного лиття заготовок (МНЛЗ). Цифровий двійник може імітувати те, як зміна складу сплаву впливає на швидкість тверднення. Це дає можливість покращити рецептури сталі. Згідно зі звітом McKinsey за 2024 рік, використання цифрових двійників у виробництві допомагає скоротити час, потрібний для розробки нових процесів, на 30-50%.

Крім того, завдяки об'єднанню з Інтернетом речей (IoT) можна збирати дані з великої кількості датчиків. Це дає чітке бачення того, як розвивається процес. Аналізуються вібрації, тиск і теплові поля. Алгоритми обробки великих даних (Big

Data) обробляють величезні обсяги інформації (петабайти), щоб знайти приховані залежності.

Штучний інтелект, який є частиною цифрового двійника, може самостійно змінювати параметри. Наприклад, якщо виявляється ризик появи тріщин, то зменшується інтенсивність охолодження. Використання хмарних обчислень робить модель доступною для команд з усього світу, що дозволяє інженерам спільно працювати незалежно від їх місцезнаходження.

Звісно, є і складності. Одна з них - забезпечення кібербезпеки. Якщо в системі є слабкі місця, це може призвести до диверсій. Для вирішення цієї проблеми рекомендується використовувати блокчейн для захисту інформації.

В цілому, цифрові двійники змінюють традиційний підхід до виробництва, перетворюючи його на інтелектуальне виробництво. Це призводить до збільшення продуктивності на 20-40% і зниження витрат на технічне обслуговування.

Технології Industry 4.0, такі як IoT, Big Data, ШІ, хмарні обчислення, цифрові двійники, створюють безліч нових можливостей для інтелектуалізації процесу кристалізації металу на МНЛЗ. Вони дозволяють підвищити точність контролю, прогнозувати дефекти, оптимізувати параметри лиття та покращити якість заготовок. Впровадження цих технологій потребує вирішення ряду проблем, включаючи фінансові, технічні і організаційні питання.

1.3 Аналіз вітчизняних досліджень.

У науковій праці "Особливості застосування нанорозмірних частинок для модифікування структури металевих сплавів", детально проаналізовано, як саме мікро- та наночастинки впливають на формування зародків кристалізації та їхній подальший розвиток у процесі затвердіння розплавлених металів. Увагу зосереджено на здатності металевих розплавів поглинати ці частинки, на їх

змочуванні та модифікуючих властивостях. Досліджується, яким чином введення мікро- та наночастинок змінює процес утворення центрів кристалізації та їхній ріст під час затвердіння металевих розплавів. Розглядаються можливі сценарії, за яких частинки стають активними центрами кристалізації, впливають на швидкість росту кристалів та їхню кінцеву структуру. Оцінюється взаємодія між наночастинками та металевим розплавом на міжфазній межі. Вивчається роль поверхневих сил і електроконтактної взаємодії у формуванні зародків кристалізації на підкладках малого розміру. Аналізується можливість управління процесом гетерогенної кристалізації, коли наночастинки виступають як готові центри для формування кристалічної структури [6].

Переваги застосування такого підходу:

- Підвищення міцності і пластичності металів.
- Зменшення енергетичних витрат на кристалізацію.
- Покращення характеристик литих структур.

Недоліки застосування такого підходу:

- Обмежена стабільність модифікаторів при тривалих витримках і високих температурах.
- Необхідність удосконалення методів введення наночастинок у розплав.

У роботі "Математична модель теплового стану заготовок для вдосконалення процесу кристалізації на МБЛЗ" розроблено математичну модель, яка покликана відобразити складну взаємодію фізичних явищ, що відбуваються під час кристалізації. Ця модель бере до уваги конвекційний рух рідкого металу, ріст кристалічної структури, а також інші фізико-хімічні процеси, що впливають на формування злитка.

Автори роботи акцентують увагу на тому, що кінцева структура злитка є результатом комплексної взаємодії багатьох факторів. Ці фактори включають теплові процеси, гідродинаміку розплаву, кінетику кристалізації та властивості використовуваних матеріалів, саме це робить розробку ефективної системи

керування процесом кристалізації металу на установках неперервного лиття (МНЛЗ) доволі важким завданням. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати системи оцінювання теплового стану заготовок, що дозволяють в реальному часі відстежувати та коригувати параметри процесу лиття.

Важливість розробленої математичної моделі полягає в її здатності прогнозувати зміни теплового стану заготовок залежно від різних технологічних параметрів, таких як швидкість витягування, температура охолодження, хімічний склад металу тощо [2].

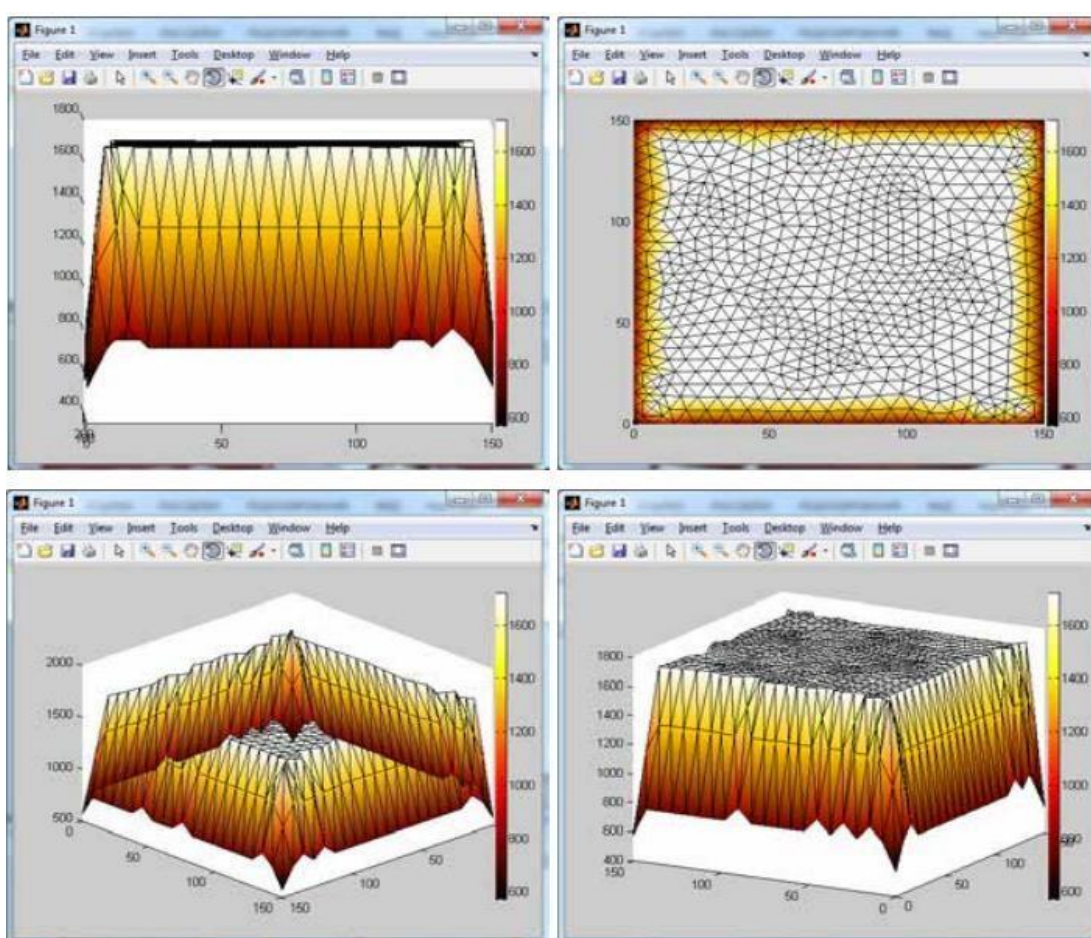


Рисунок. 1.3 - моделювання теплового стану заготовок

У науковій праці "Вплив технологічних параметрів розливання і кристалізації сталі на якість безперервнолитої заготовки" детально вивчено, як саме процес розливання та затвердіння сталі впливає на кінцеву якість безперервнолитої заготовки. Головна мета дослідження полягала у визначенні

оптимальних технологічних умов для збільшення швидкості розливання рідкої сталі, особливо тих марок, що мають високий вміст вуглецю.

В рамках дослідження було проведено серію експериментів з різними режимами розливання та кристалізації. Результати цих експериментів були ретельно проаналізовані та порівняні з результатами, отриманими при використанні стандартних, вже існуючих методів. Аналіз показав, що експериментальні режими дозволили помітно зменшити кількість дефектів у заготовках, зокрема, зменшилась кількість тріщин та центральної пористості [1].

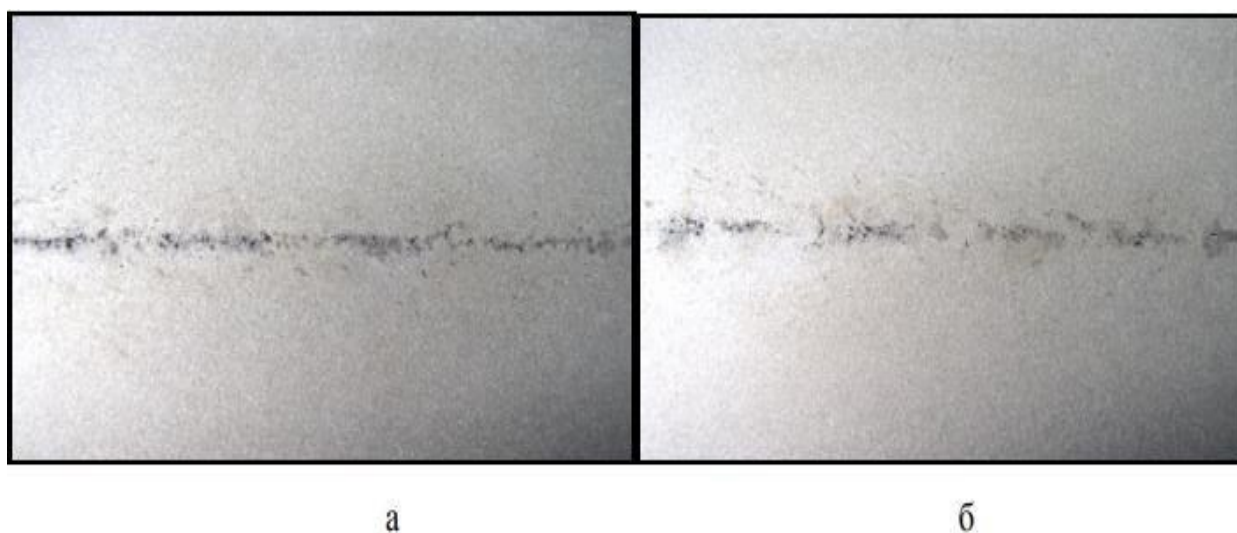


Рисунок. 1.4 - макроструктура поздовжніх темплетів безперервнолитої заготовки зі сталі С86D, відлитої з різними швидкостями, а - середня швидкість витягування заготовки 2,43 м/хв; б - середня швидкість витягування 3,28 м/хв.

У статті "Сучасний стан виробництва якісної сталі на МНЛЗ в умовах ВАТ "ДМКД" розглянуто виробництво якісної сталі на машинах неперервного лиття заготовок (МНЛЗ) на металургійному підприємстві ВАТ ДМКД. Автори вивчають критерії оцінки якості безперервнолитих злитків, аналізують структуру сталевих виробництва в Україні та пропонують шляхи покращення характеристик сталевих заготовок.

Автори вказують, що розвиток сталеплавильного виробництва залежить від використання безперервного розливання сталі. У світі близько 60% сталі виготовляється безперервним литтям, і цей показник росте через економічні та

технічні переваги, такі як швидкість виробництва, збільшення виходу металу, менші витрати енергії та кращі умови праці.

Дослідження сортаменту прокату в Україні показало, що 78% - це вуглецеві сталі, 16,3% - низьколеговані, а 5,7% - леговані сталі. З цього випливає, що більшість прокату можна розливати на наявних МНЛЗ. Проте є питання щодо розливання киплячих сталей, яке вирішують, використовуючи їхні замінники.

Важливим для поліпшення якості металу є зменшення кількості шкідливих домішок і неметалічних включень. Автори підкреслюють, що поняття чиста сталь змінюється, оскільки вимоги до якості металу зростають. Дефекти у безперервнолитих заготовках можуть бути всередині або на поверхні. Вони з'являються через різні причини, включно зі зносом обладнання та неправильною формою кристалізатора [3].

Для мінімізації дефектів автори пропонують:

- Контроль твердості конструкції МНЛЗ, що має забезпечувати точність осі в межах $\pm 0,5$ мм.
- Контроль деформації роликів.
- Комбінований контроль рівня металу в кристалізаторі з автоматичним коригуванням витрати металу у проміжному ковші.
- Автоматичне регулювання конусності зазорів роликів залежно від швидкості розливання та розміру заготовки.
- Динамічне регулювання подачі води у зоні вторинного охолодження відповідно до температурного режиму.

У праці "Інноваційні шляхи керування процесом формування кристалічної будови металевих сплавів" автори зосереджуються на важливості поліпшення технологій плавлення та лиття для забезпечення високої якості металевих виробів. Основна мета дослідження - створення науково-підтверджених способів контролю структури литих металів шляхом зміни швидкості кристалізації та ступеня переохолодження на межі фаз.

У дослідженні використано фізичне моделювання кристалізації, що дало змогу в ході експериментів визначити, як нагрівання, охолодження та механічна вібрація впливають на структуру металів. Результати виявили, що температурні впливи суттєво впливають на кристалізацію та мікроструктуру литих сплавів.

Зі збільшенням температури нагріву швидкість кристалізації падає, що призводить до утворення грубої структури зерна та збільшення ліквідації домішок між зернами. При цьому, посилене охолодження може частково зменшити негативний ефект перегріву, зменшуючи розмір зерна [4].

Стаття "Процеси структуроутворення в сталевих злитках при теплосилових діях на метал" розглядає, як теплові та силові дії впливають на утворення структури у великих сталевих злитках (до 600 т). Автори вивчають, як кристалізуються великі сталеві злитки, як утворюються відмінності в хімічному складі та фізичних властивостях, як розподіляються неметалеві включення та домішки. Вони також пропонують способи покращити якість злитків, регулюючи швидкість відведення тепла.

Утворення внутрішніх дефектів у великих злитках зумовлене складними фізико-хімічними, гідродинамічними та теплофізичними процесами, коли метал переходить з рідкого стану в твердий. Автори наголошують, що дефекти, які з'являються під час кристалізації, неможливо виправити пізніше, тому важливо контролювати процес структуроутворення.

Утворення внутрішніх дефектів у великих злитках зумовлене складними фізико-хімічними, гідродинамічними та теплофізичними процесами, коли метал переходить з рідкого стану в твердий. Автори наголошують, що дефекти, які з'являються під час кристалізації, неможливо виправити пізніше, тому важливо контролювати процес структуроутворення.

Дослідження базувалося на фізичному моделюванні кристалізації злитків з використанням прозорих моделей. З'ясовано, що швидкість кристалізації значно

залежить від різниці температур перед фронтом твердіння металу, що визначає інтенсивність теплообміну та розподіл домішок [5].

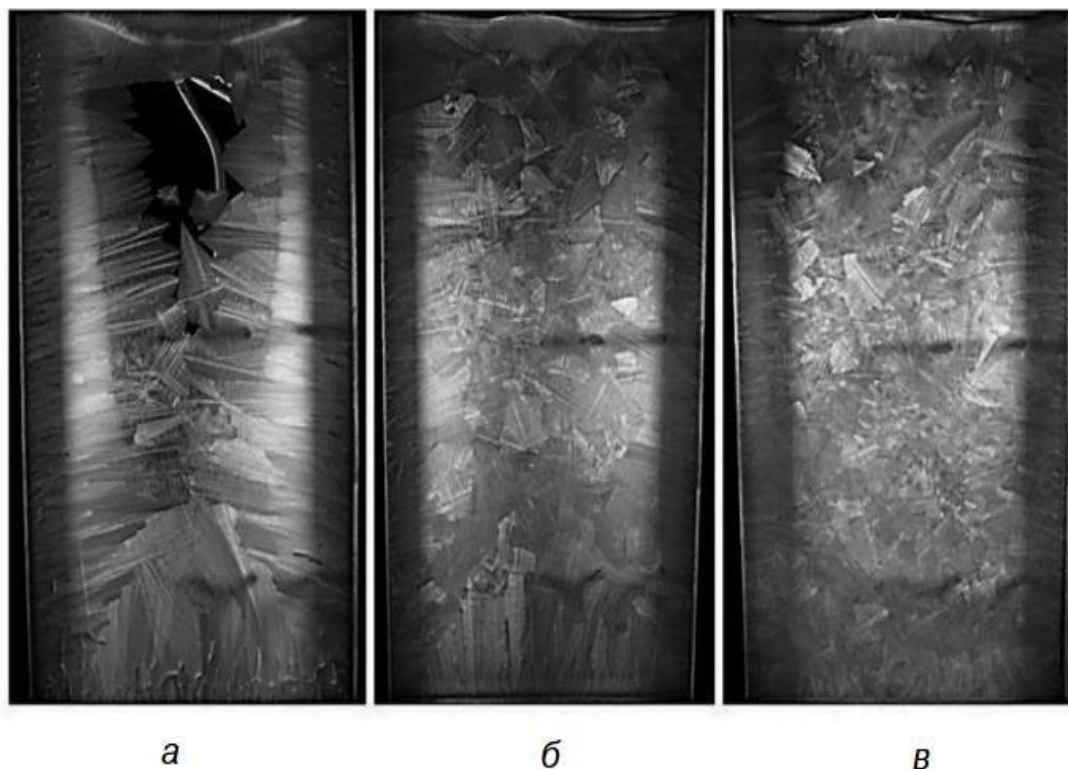


Рисунок. 1.5 - структура злитків, одержаних при різній інтенсивності процесів тепловідведення від сплаву: а – висока; б – середня; в – низька

Наукове дослідження "Спрощена математична модель теплофізичного процесу кристалізації металу" в якому автор розглядає просту математичну модель кристалізації рідкого металу, зосереджуючись на теплообміні під час затвердіння та його математичному описі. Автор застосовує рівняння теплопровідності Фур'є з урахуванням дієвого коефіцієнта теплопровідності та досліджує, як умови теплообміну впливають на швидкість кристалізації.

Кристалізація описана через взаємодію теплопередачі в матеріалі та природної конвекції на зовнішній поверхні зливка. Головна мета автора - визначити швидкість кристалізації металу по перерізу заготовки та розрахувати умови теплообміну, щоб керувати цим.

У статті застосовано математичне моделювання теплообміну під час кристалізації металу. Для числового розв'язку диференціальних рівнянь теплопровідності використано метод кінцевих різниць. Автор подає алгоритм розрахунку температурних полів при затвердінні металу, особливо для сплавів з двофазною областю кристалізації.

Досліджено перехід рідкого металу в твердий стан і встановлено зв'язок між швидкістю охолодження та утворенням мікрокристалічної структури. Враховано вплив теплопередачі через форму, тепловідведення в довкілля та фазові перетворення в металі [8].

"Метод дослідження процесу затвердіння безперервнолитої заготовки у кристалізаторі МНЛЗ" представляє огляд існуючих способів вивчення кристалізації сталі в кристалізаторах машин безперервного лиття заготовок. Автори пропонують новий метод нахилого зондування, який не руйнує заготовку. Цей метод дозволяє швидко вимірювати товщину затверділої оболонки металу під час лиття, що допомагає регулювати параметри процесу [7].

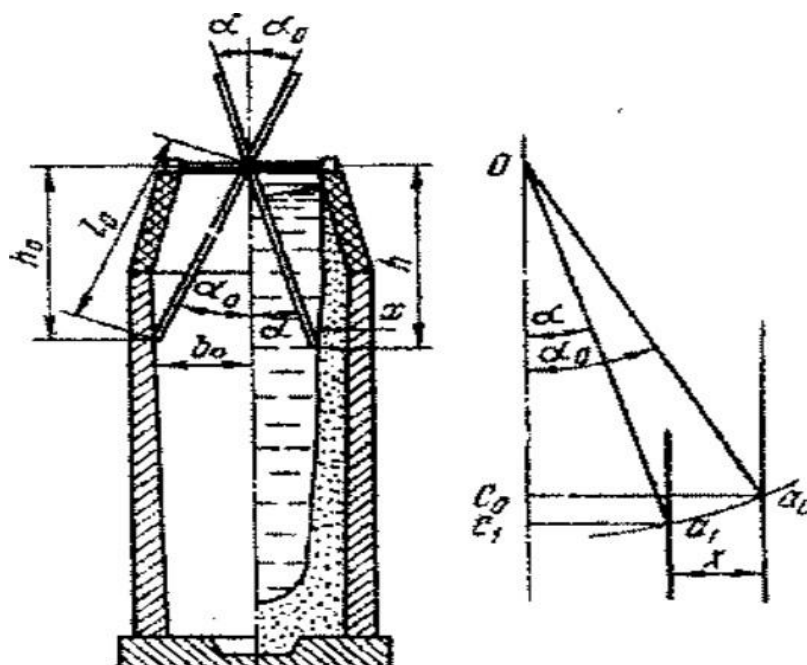


Рисунок. 1.6 - схема методу горизонтального зондування сталевго зливка, що твердіє.

У статті "Фізичне моделювання асиметричного витікання металу у кристалізатор слябової машини безперервного лиття заготовок" описано фізичне моделювання поведінки рідкої сталі в кристалізаторі МБЛЗ, коли занурений стакан засмічується включеннями. Розглянуто декілька типових випадків. Досліджено утворення вихорів у кристалізаторі та їхні основні негативні наслідки. З'ясовано, що вихори з'являються через несиметричний рух металу, що затягує шлак і включення у ванну з розплавом [10].

1.4 Аналіз зарубіжних досліджень.

У дослідженні "Numerical Modeling of Continuous Casting Process for Steel." автори сконцентрувалися на створенні числової моделі цього процесу для вивчення теплообміну та кристалізації. Їхньою метою було точніше передбачити розподіл температури в заготовці та зменшити ймовірність дефектів.

Для створення числової моделі використали метод кінцевих елементів. У розрахунках врахували рух рідкого металу, процеси теплообміну та зміну фаз.

Дослідження виявило, що нерівномірне охолодження значно впливає на внутрішні напруження та утворення тріщин у металі. Оптимізувавши температуру, можна покращити якість сталі та зменшити кількість дефектів.

Числове моделювання показало себе дієвим способом покращити технологічний процес. Отримані дані можна застосувати для удосконалення контролю над процесом безперервного лиття [11].

В науковій роботі "Simulation of Heat Transfer and Solidification in Continuous Casting of Steel". Автори вказують, що контрольоване охолодження при литті дуже важливе для запобігання тріщинам, розшаруванню домішок та внутрішнім дефектам. За останні десятиліття комп'ютерне моделювання стало основним

інструментом для вивчення та покращення цього процесу, даючи змогу краще прогнозувати вплив технологічних параметрів на якість заготовки.

Головна мета роботи - створити тривимірну комп'ютерну модель теплообміну та кристалізації рідкої сталі в умовах безперервного лиття. Автори хочуть вивчити, як технологічні параметри, такі як швидкість витягування заготовки, температура заливки та інтенсивність охолодження, впливають на структуру твердого шару та утворення дефектів. Автори роблять висновок, що розроблена комп'ютерна модель може бути корисна для прогнозування та покращення технології безперервного лиття сталі [12].

У праці "Advanced Modeling Techniques in Continuous Casting of Steel". Автори порівнюють методи кінцевих елементів (МКЕ), обчислювальної гідродинаміки (CFD) та мультифізичного моделювання. Основна ціль – вивчення сучасних чисельних методів для моделювання безперервного лиття сталі. Автори вивчають, як ці методи допомагають прогнозувати формування твердого шару, теплообмін між металом, кристалізатором і зоною охолодження, а також виявляють умови, за яких утворюються дефекти в заготовках.

Автори стверджують, що сучасні методи моделювання здатні значно покращити контроль за процесом безперервного лиття сталі. Найкраще себе показали комбіновані моделі (МКЕ+CFD), що дають змогу одночасно вивчати теплообмін, рух рідкого металу та механічні напруження. Результати цієї роботи можна застосовувати для створення автоматизованих систем контролю параметрів лиття. Це допоможе зменшити кількість дефектів і покращити якість сталевих заготовок [13].

В дописі "Integrated Process Modeling of Continuous Casting and Cooling of Steel Slabs". Автори вказують, що чимало робіт розглядають лише окремі етапи лиття чи охолодження. Вони стверджують, що об'єднане моделювання всієї системи дає кращі результати для якості сталевих слябів.

Важливість цієї роботи полягає в тому, що наявні моделі лиття часто не беруть до уваги складну взаємодію між початковим (кристалізатор) та вторинним охолодженням (система розпилювачів). Це може спричинити нерівномірне затвердіння, внутрішні напруження та мікротріщини.

З'ясовано, що віддача тепла в зоні кристалізатора залежить від щільності контакту між металом і мідною формою. Прискорене витягування може зменшити товщину твердої оболонки, збільшуючи ризик витікання розплавленого металу.

Доведено, що нерівномірний розподіл води з розпилювачів утворює локальні перепади температури, що призводить до появи тріщин на поверхні. Правильне регулювання інтенсивності розпилення дає змогу досягти рівномірного затвердіння та зменшити напруження в матеріалі.

Комп'ютерне моделювання виявило, що напруження від швидкого охолодження можуть викликати внутрішні недоліки. Контрольоване охолодження з регулюванням температури зменшує ймовірність утворення мікротріщин [14].

У роботі "Optimization of Continuous Casting Process by Numerical Simulation." автори прагнуть створити обчислювальну модель безперервного лиття сталі. Їх мета - знайти найкращі параметри процесу, щоб зменшити кількість дефектів і зробити структуру заготовки більш однорідною. Вони вивчають, як температура та швидкість лиття впливають на товщину твердого шару, а ще - як додаткове охолодження допомагає знизити внутрішню напругу.

У результаті досліджень автори створили обчислювальну модель, яка добре передбачає, як розподіляється температура і відбувається затвердіння заготовки. Вдалося знайти оптимальні параметри лиття: температура розливу має бути в межах 1550-1565°C, швидкість - 1.3-1.5 м/хв, а охолодження - 0.4-0.6 л/кг. Це допомагає звести до мінімуму ризик появи дефектів [15].

У праці "Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting." автори підкреслюють, що математичне моделювання розливання та циркулювання сталі в кристалізаторі є дієвим способом зрозуміти, як різні параметри впливають на якість

сталі. Головна увага приділена аналізу руху рідкого металу за допомогою числових моделей та перевірці результатів на основі промислових дослідів.

З'ясовано, що основний потік металу утворюється двома циркуляційними колами: верхнє коло (біля поверхні металу) - найсильніше, воно впливає на рівень металу та стабільність порошкової шлакової плівки. Нижнє коло - повільніше, воно відповідає за розподіл домішок та рівномірність затвердіння.

Якщо швидкість вхідного потоку дуже велика (понад 1.5 м/с), це може викликати турбулентність на поверхні металу, що призведе до утворення шлакових включень.

Дослідження довело, що зміна кута нахилу струменя металу (з 15° до 25°) поліпшує циркуляцію рідини, зменшуючи ризик ліквідації домішок. Застосування кристалізаторів із заокругленими кутами допомагає рівномірніше розподілити потоки та знизити локальні зони перегріву [16].

Дослідження "Thermo-mechanical model of steel shell behavior in the continuous casting mold, applied to formation of longitudinal facial cracks." розглядається термомеханічна модель поведінки сталеві оболонки у кристалізаторі машини неперервного лиття заготовок (МНЛЗ).

Особливу увагу приділено механізму утворення поздовжніх тріщин на поверхні зливка, а також вивчено чинники, що зумовлюють їхню появу [17].

У статті "Numerical analysis of heat transfer and solidification in a continuous casting mold with mold flux." виконано числовий аналіз теплообміну та затвердіння у кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок із застосуванням шлакової плівки. Автори вивчають, як шлакова плівка впливає на затвердіння та якість поверхні заготовки [18]. В свою чергу робота "Performance and properties of mould fluxes." Доповідає про властивості й дію шлакових плівок у кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок. Автори розглядають, як склад шлаку впливає на теплообмін, змащення й утворення дефектів на поверхні заготовки [19].

Допис "A coupled simulation of fluid flow, heat transfer and solidification in continuous casting." представляє поєднану модель течії рідини, теплообміну та затвердіння під час безперервного лиття. Автори вивчають взаємодію цих процесів у кристалізаторі та їхній вплив на якість заготовки. Це дослідження дає детальне розуміння процесів у кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок і може бути корисним для поліпшення технологій безперервного лиття сталі [20].

1.5 Визначення патенту.

В Україні, як і в багатьох інших країнах світу, патент виступає ключовим інструментом захисту інтелектуальної власності. Його видає державний орган, уповноважений на це, - в Україні це, зокрема, Міністерство економіки - автору чи власнику винаходу, корисної моделі або промислового зразка. Суть патенту полягає не лише у фіксації авторства, але й у наданні власнику виключного права на використання свого творіння, а також забезпечення правового захисту від його несанкціонованого використання іншими особами.

Патент є одним із видів інтелектуальної власності, що надає власнику монополію на свій винахід протягом чітко визначеного терміну. Зазвичай, для винаходів цей термін становить 20 років, тоді як для корисних моделей та промислових зразків він може коливатися в межах 10-15 років, залежно від положень національного законодавства. Це означає, що будь-яке виробництво, продаж або комерційне використання запатентованого об'єкта без згоди патентовласника є незаконним.

Процес отримання патенту починається з подачі відповідної заявки до патентного відомства. Ця заявка повинна містити детальний опис винаходу, формулу, що визначає обсяг правової охорони, креслення (якщо вони потрібні для розуміння суті винаходу) та реферат, який коротко викладає суть винаходу. Важливою умовою для отримання патенту є відповідність винаходу трьом

основним критеріям: новизні (винахід не повинен бути відомий з попереднього рівня техніки), винахідницькому рівню (винахід не повинен бути очевидним для фахівця в даній галузі) та промисловій придатності (винахід має бути принципово придатним для застосування в промисловості або іншій сфері діяльності).

Крім захисту прав автора, патент може бути важливим активом для отримання прибутку. Власник патенту може передати свої права іншим особам через ліцензійні угоди, дозволяючи їм використовувати винахід на певних умовах, або продати патент повністю. У випадку, якщо хтось порушує права власника патенту, він має право звернутися до суду для захисту своїх інтересів та відшкодування збитків, завданих порушенням його прав. Патентна система стимулює розвиток інновацій та технологічний прогрес, оскільки винагороди за творчу діяльність захищені законом.

1.6 Аналіз патенту №UA95200C2.

В описі патенту йдеться про установку, що складається з форми (кристалізатора), з якої виливається неперервнолита заготовка. Ця заготовка рухається вздовж напрямної, яка може бути прямою або криволінійною. Напрямна утворена роликами, розташованими послідовно. Одночасно заготовка проходить через камеру охолодження з обприскуючими елементами. Важливо, що кожен ролик жорстко закріплений.

Ролики згруповані в центрувальні модулі, а обприскуючі елементи - в окремі модулі, розташовані один за одним. Ці обприскуючі елементи можуть регулюватися для забезпечення концентричного розташування відносно осі заготовки. Таке рішення дозволяє зменшити ризик перегріву роликів і пошкоджень поверхні заготовки, забезпечуючи більш рівномірне її охолодження.

В цілому, патент описує установку для безперервного лиття, яка включає подачу розплавленого металу, систему охолодження і механізм для витягування та різання

готової продукції. Ключовим нововведенням є модернізований кристалізатор, який сприяє збалансованому розподілу температури та швидкості охолодження. Це дає змогу виробляти заготовки високої якості з меншою кількістю дефектів, таких як тріщини або пористість. Зазначено, що вдосконалення кристалізатора є важливим фактором для отримання якісної продукції [21]

1.7 Аналіз патенту №UA110573C2

Даний винахід належить до процесу неперервного лиття сталевго напівфабрикату, який містить: етап лиття з використанням сопла для кільцевого струменя розташованого між розливним пристроєм і ливарною формою причому згадане сопло в своїй верхній частині містить купол для відхилення рідкого металу, що надходить на вхід згаданого сопла, до внутрішньої стінки сопла, тим самим, обмежуючи внутрішній об'єм, в якому відсутній рідкий метал, виконуваний одночасно етап подачі порошку через отвір в куполі, причому розмір частинок згаданого порошку менший 200 мм, а згаданий купол містить перший засіб подачі згаданого порошку без контакту із згаданим куполом, і другий засіб, що запобігає злипанню або спіканню згаданого порошку на згаданому першому засобі.

У цьому патенті описується метод безперервного лиття металу з використанням кільцевого сопла, яке забезпечує подачу металу з розливного ковша до кристалізатора. Система дозволяє покращити умови охолодження рідкої сталі, уникнути утворення зональної ліквації та знизити ризик появи дефектів на поверхні заготовки. Окрім того, винахід спрямований на підвищення стабільності процесу та зменшення виробничих витрат [22].

1.8 Аналіз патенту №UA123456C2

Винахід стосується використання спеціалізованих полімерних покриттів у ролі бар'єрів, особливо в багатошарових матеріалах. Як полімери для цих шарів пропонуються кополімери, утворені з етилену та вінілового спирту.

Ці бар'єрні шари характеризуються вибірковою проникністю для різних газів, з помітно високим ступенем затримки гідрофторолефінів (HFO). Завдяки цим характеристикам, інтеграція таких шарів може позитивно модифікувати теплоізоляційні властивості, наприклад, у трубопроводах з тепловою ізоляцією, як це зазначено в джерел.

Розглянемо глибше функціональність та потенційні переваги такого підходу. Використання полімерних шарів як газових бар'єрів не є абсолютно новою концепцією, проте вибір конкретних кополімерів на основі етилену та їх здатність селективно блокувати HFO відкриває цікаві перспективи для низки застосувань. HFO набувають все більшого значення як альтернатива традиційним холодоагентам, які мають більш високий потенціал глобального потепління. Здатність стримувати їх витік є важливою для підтримки екологічної стійкості та відповідності нормативним вимогам.

У контексті теплоізованих труб, використання таких полімерних шарів може призвести до зменшення втрат тепла, що, в свою чергу, знижує енергоспоживання та експлуатаційні витрати системи. Це особливо актуально для систем опалення та охолодження, де ефективна ізоляція відіграє важливу роль у мінімізації енергетичних втрат. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення впливу різних факторів, таких як товщина шару, температура та вологість, на бар'єрні властивості та загальну продуктивність матеріалу. Також важливим є питання довговічності та стійкості полімерних шарів до впливу навколишнього середовища, щоб забезпечити їх надійну роботу протягом тривалого часу [23].

1.9 Аналіз патенту № UA125356U

Запатентовано нову конструкцію машини для безперервного лиття заготовок. Ця машина складається з декількох ключових елементів, включаючи запал (стартовий елемент для формування заготовки), рольганг, який розташований за пристроєм для різання заготовок, а також спеціальний пристрій для паркування запалу.

Пристрій для паркування запалу має таку будову: під роликами рольганга проходить вал, на якому закріплені куліси з ложементами (опорами). Крім цього, є кронштейн з приводом, який забезпечує поворот цього вала.

Особливість конструкції полягає в тому, що кожен ролик рольганга має лише один обмежувальний бортик, який слугує як для запалу, так і для самої заготовки. Водночас, кожна куліса з ложементом, закріплена на валу, має два обмежувальні бортики. Ці бортики розташовані таким чином, що по черзі один з них обмежує бокове зміщення запалу, а інший - бокове зміщення вже сформованої заготовки.

Описана конструкція дозволяє ефективно і надійно паркувати запал після того, як процес лиття завершено. Це сприяє безперебійній роботі машини та покращує загальну продуктивність процесу безперервного лиття. Конструкція забезпечує чітке центрування елементів, зменшуючи ризик збою процесу [24].

1.10 Аналіз патенту № UA142035U

Запатентовано вертикальну машину неперервного лиття заготівок. Вертикальна машина неперервного лиття (МНЛЗ) розроблена для виробництва сталевих заготівок. Ця машина включає в себе декілька основних компонентів, розташованих у певній послідовності для забезпечення безперервного процесу лиття.

На початку процесу знаходиться кристалізатор. Це спеціальна форма, в яку заливається рідкий метал. У кристалізаторі метал починає тверднути, утворюючи зовнішню кірку заготовки.

Далі за кристалізатором розташовані секції вторинного охолодження (СВО). СВО відповідають за подальше охолодження та затвердіння металу. Кожна секція складається з рухомих та нерухомих рам, з'єднаних між собою. Ці рами оснащені неприводними роликами, які підтримують заготовку під час її руху.

Особливістю цієї конструкції є наявність хоча б однієї секції СВО, обладнаної двома або більше парами рухомих приводних роликів. Ці ролики допомагають протягувати заготовку через машину. Приводні ролики рухомої рами з'єднані з гідроциліндрами поршневого типу, які забезпечують їх переміщення. Це дозволяє регулювати тиск на заготовку та контролювати швидкість її руху.

Приводні ролики нерухомої рами також з'єднані з гідроциліндрами, але вже плунжерного типу. Важливо, що діаметр поршня в гідроциліндрах рухомої рами більший за діаметр плунжера в гідроциліндрах нерухомої рами. Це створює різницю в зусиллях, що прикладені до заготовки з різних сторін, що сприяє більш рівномірному охолодженню та формуванню.

Для початку процесу лиття використовується твердий запал. У цій конструкції запал виконаний як єдина деталь, що спрощує його використання та підвищує надійність системи.

Ключовою особливістю цієї конструкції є впровадження системи рухомих і нерухомих рам, оснащених приводними роликами. Таке рішення дозволяє забезпечити рівномірний розподіл тиску по всій поверхні заготовки. Рівномірний тиск є критично важливим фактором, оскільки він мінімізує ймовірність виникнення дефектів, таких як тріщини, пористість або внутрішні напруження, які можуть суттєво вплинути на міцність і довговічність готового виробу.

Крім того, в конструкції МНЛЗ передбачено застосування гідроциліндрів різних типів. Це технічне рішення спрямоване на гнучке регулювання зусиль, які прикладаються до заготовки. Завдяки можливості адаптації зусилля до конкретних умов процесу, вдається досягти оптимального режиму формування, що сприяє покращенню мікроструктури металу та підвищенню його механічних властивостей. Вибір відповідних параметрів зусилля на основі конкретних вимог до матеріалу та геометрії заготовки дозволяє досягти найкращих результатів у процесі лиття[25].

РОЗДІЛ 2

РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Проектування загальної архітектури системи на базі еталонних архітектур Industry 4.0.

Спроектowana архітектура системи складається з трьох основних рівнів:

Перший рівень - рівень фізичних активів (Field level), або рівень безпосереднього контакту з обладнанням, відіграє критично важливу роль у системі автоматизованого керування процесом кристалізації. Він є первинним джерелом даних, які використовуються для моніторингу, контролю та оптимізації всього процесу. Розглянемо детальніше компоненти, функціональність, технології та особливості реалізації цього рівня.

На фізичному рівні розташовані пристрої, що безпосередньо взаємодіють з процесом кристалізації. До них належать:

Датчики (сенсори): Ці пристрої вимірюють різноманітні параметри процесу, такі як температура, тиск, рівень рідини, концентрація розчинених речовин, швидкість потоку та інші важливі показники. Вибір конкретних типів датчиків залежить від специфіки процесу кристалізації та вимог до точності вимірювань.

Виконавчі механізми: Ці пристрої, навпаки, здійснюють фізичний вплив на процес, змінюючи його параметри. Прикладами виконавчих механізмів є клапани, насоси, нагрівальні елементи, мішалки та інші пристрої, що регулюють потік, температуру, тиск та інші змінні процесу.

Промислові контролери (PLC): Програмовані логічні контролери (PLC) є мозком фізичного рівня. Вони отримують дані від датчиків, обробляють їх згідно з заданою програмою (алгоритмами керування) і видають команди на виконавчі механізми. PLC забезпечують автоматичне керування процесом кристалізації в реальному часі.

Основні функції фізичного рівня полягають у наступному:

Збір даних про параметри кристалізації: Датчики безперервно вимірюють різні параметри процесу і передають відповідні сигнали на PLC. Це забезпечує постійний моніторинг стану процесу.

Передача команд управління: На основі отриманих даних і запрограмованих алгоритмів, PLC генерує команди управління для виконавчих механізмів. Ці команди можуть включати відкриття/закриття клапанів, вмикання/вимикання насосів, регулювання потужності нагрівальних елементів тощо.

Забезпечення зворотного зв'язку: Виконавчі механізми, у свою чергу, можуть мати датчики зворотного зв'язку, що повідомляють про фактичне виконання команди. Це дозволяє PLC контролювати правильність виконання команд і, у разі потреби, вносити корективи.

Для забезпечення ефективної взаємодії між компонентами фізичного рівня, а також для передачі даних на вищі рівні системи керування, використовуються різні технології зв'язку. У розробленій архітектурі використано OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture): Це сучасний протокол зв'язку, який забезпечує безпечний та надійний обмін даними між різними пристроями та системами в промисловій автоматизації. OPC UA є платформо-незалежним і підтримує різноманітні типи даних. Його використання дозволяє інтегрувати PLC з іншими системами, такими як SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) та MES (Manufacturing Execution System).

Другий рівень - рівень збору та обробки даних (Edge Level). На периферійному рівні, де відбувається безпосередній збір і первинна обробка даних, ключову роль відіграє інтегрована система, що розгорнута на сервері SCADA.

Локальний SCADA сервер, сервер що слугує центральним ядром для збору даних із різноманітних датчиків, розташованих безпосередньо на виробничих лініях або в інших критичних точках моніторингу. SCADA-система забезпечує стабільний зв'язок із цими пристроями, збирає інформацію в реальному часі та

передає відповідні дані для подальшої обробки та візуалізації. Система відповідає за збір потоків даних із різних датчиків, які можуть включати температуру, тиск, рівень рідини, швидкість обертання, електричні параметри та інші важливі показники. Дані збираються в єдину базу, що надає можливість аналізувати їх у комплексі. Зібрані дані піддаються початковій обробці, яка може включати фільтрацію шумів, перетворення одиниць вимірювання, виявлення аномалій та інші операції, необхідні для підготовки даних до подальшого аналізу. Це дозволяє зменшити обсяг даних, що передаються на вищі рівні системи, і зосередитися на дійсно важливій інформації. Система здатна виконувати прості обчислення, такі як середні значення, мінімуми, максимуми, стандартні відхилення та інші статистичні показники. Це дозволяє в реальному часі отримувати уявлення про основні тенденції та відхилення, що відбуваються в технологічному процесі.

У підсумку, рівень збору та обробки даних виконує критично важливу функцію збору, попередньої обробки та аналізу даних безпосередньо на місці, забезпечуючи оперативну інформацію для подальшого прийняття рішень та оптимізації виробничих процесів.

Третій рівень - рівень аналізу та візуалізації (Control and Visualization Level). Цей рівень системи відповідає за забезпечення операторів інтуїтивним інтерфейсом для моніторингу та контролю за процесом кристалізації.

В основі рівня знаходяться НМІ (Human-Machine Interface) інтерфейси, що відображають дані про процес у зручному для сприйняття форматі. Робочі станції операторів забезпечують необхідну обчислювальну потужність та можливості для взаємодії з системою. Додатково, веб-клієнт надає можливість віддаленого доступу до даних та функцій управління. Це дозволяє операторам та інженерам спостерігати за процесом та вносити необхідні зміни з будь-якої локації, де є доступ до мережі. Головним завданням цього рівня є візуалізація ключових параметрів процесу кристалізації. Це включає в себе відображення поточних значень температури, тиску, швидкості потоку, концентрації розчину, розміру кристалів та інших важливих показників. Оператори можуть спостерігати за динамікою процесу

в режимі реального часу, аналізувати тренди та виявляти відхилення від заданих параметрів. Візуалізація також передбачає наявність інструментів для генерування тривог та повідомлень у випадку виникнення позаштатних ситуацій.

Для створення HMI-інтерфейсів використовується графічний редактор SCADA-систем. Цей інструмент дозволяє розробляти інтерактивні панелі, що містять графіки, діаграми, кнопки управління та інші елементи. Для забезпечення віддаленого доступу використовується Web Client. Він дозволяє отримати доступ до HMI-інтерфейсу через веб-браузер, що забезпечує гнучкість та мобільність для операторів.

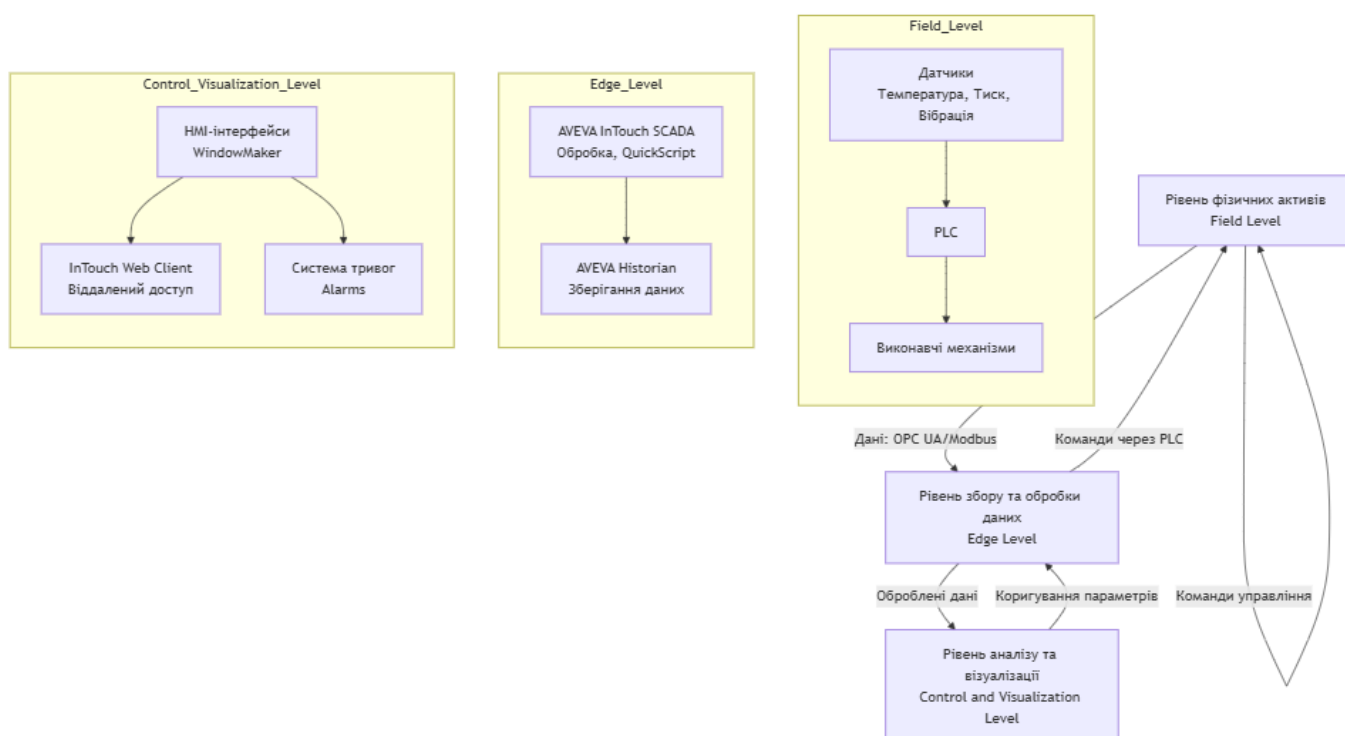


Рисунок. 2.1 - створена архітектура системи.

2.2. Обґрунтування вибору програмного забезпечення для реалізації системи.

Кристалізації металу на машині неперервного лиття заготовок (МНЛЗ) є надзвичайно важливим кроком. Від цього вибору залежить стабільність, функціональність і продуктивність всієї системи.

Розглянемо детальніше, чому цей вибір такий важливий. У сучасному металургійному виробництві, яке прагне відповідати стандартам Industry 4.0, системи моніторингу та управління процесами мають бути не просто інструментом спостереження, а інтегрованою частиною виробничого процесу. Це означає, що система повинна забезпечувати:

Збір даних у реальному часі: Збирати інформацію з різних датчиків і пристроїв на МНЛЗ без затримок. Це включає температуру, тиск, швидкість лиття, склад сплаву та інші важливі параметри.

Обробку даних: Швидко обробляти великі обсяги даних, виявляти закономірності та аномалії, а також прогнозувати можливі проблеми в процесі кристалізації.

Візуалізацію даних: Представляти дані у зрозумілому вигляді, що дозволяє операторам швидко оцінювати стан процесу та приймати обґрунтовані рішення. Це можуть бути графіки, діаграми, інтерактивні моделі МНЛЗ та інші візуальні інструменти.

Інтеграцію з існуючим обладнанням: Легко інтегруватися з іншими системами управління виробництвом, такими як ERP (Enterprise Resource Planning) та MES (Manufacturing Execution System), для обміну даними та координації дій.

Після ретельного аналізу вимог, та з урахуванням специфіки металургійного виробництва, було вирішено, що AVEVA InTouch SCADA є оптимальним вибором для цієї системи. AVEVA InTouch SCADA – це програмне забезпечення, яке

широко використовується в різних галузях промисловості для моніторингу та управління виробничими процесами. Воно дозволяє створювати інтерфейси для візуалізації даних, розробляти алгоритми обробки даних та інтегруватися з різним обладнанням.

Вибір AVEVA InTouch SCADA в ролі основної платформи керування та візуалізації виробничих процесів був зумовлений низкою важливих факторів, які відповідають специфічним вимогам і задачам безперервного лиття заготовок. Розглянемо детальніше переваги InTouch SCADA, а також причини, за якими інші програмні рішення не були обрані.

По-перше, важливим аспектом є підтримка промислових протоколів. InTouch пропонує вбудовані драйвери для OPC UA, що дозволяє безперешкодно зв'язуватися з різним обладнанням МНЛЗ, включаючи програмовані логічні контролери (PLC). Це значно спрощує інтеграцію системи з існуючою інфраструктурою. Налаштування тегів для збору даних з датчиків також є досить простим, що полегшує моніторинг параметрів процесу в реальному часі.

По-друге, InTouch надає розширені можливості візуалізації. За допомогою графічного редактора WindowMaker можна створювати інтерактивні людино-машинні інтерфейси (HMI), які допомагають операторам ефективно контролювати та управляти процесом МНЛЗ. InTouch Web Client забезпечує віддалений доступ до цих інтерфейсів через веб-браузер, що підвищує гнучкість та мобільність персоналу. Це особливо важливо для оперативного реагування на будь-які зміни в процесі, адже доступ до ключової інформації можна отримати з будь-якого місця.

По-третє, варто відзначити гнучку систему сигналізації InTouch. Платформа дозволяє налаштовувати тривоги з різними рівнями пріоритетів, що допомагає операторам швидко ідентифікувати та реагувати на критичні ситуації. Звукові та візуальні сповіщення роблять реагування ще більш оперативним, а можливість надсилання повідомлень на електронну пошту забезпечує додатковий рівень інформування.

По-четверте, надійність і продуктивність InTouch є ключовими перевагами, особливо в металургійній промисловості, де обладнання працює в режимі 24/7. Система здатна обробляти значну кількість тегів (до 1000) з мінімальною затримкою (менше 1 секунди), що повністю відповідає вимогам МНЛЗ. Це гарантує стабільну і безперебійну роботу системи, що є вирішальним фактором для забезпечення якості продукції та безпеки процесу.

Розглядаючи альтернативи, Siemens WinCC, безумовно, має свої переваги, зокрема тісну інтеграцію з PLC Siemens та потужні можливості візуалізації. Тим не менш, вартість ліцензій на WinCC є вищою порівняно з InTouch, а гнучкість у налаштуванні HMI є дещо обмеженою. Крім того, підтримка обладнання інших виробників (не-Siemens) також може бути проблематичною.

Щодо Ignition від Inductive Automation, то ця платформа має меншу поширеність у металургійній промисловості, а також обмежену підтримку складних HMI-інтерфейсів порівняно з InTouch.

Враховуючи всі ці фактори, вибір на користь AVEVA InTouch SCADA видається обґрунтованим і оптимальним рішенням для забезпечення надійного, ефективного та гнучкого управління процесом безперервної розливки сталі.

Для програмування програмованих логічних контролерів (ПЛК) було вирішено застосувати програмний інструмент PLCnext Engineer. Це середовище являє собою комплексну платформу для автоматизації промислових процесів, яка поєднує в собі відкриту апаратну частину, модульний програмний склад, широке коло користувачів та інтернет-магазин готових рішень. Вибір на користь PLCnext Engineer обумовлений кількома суттєвими причинами, пов'язаними з актуальними вимогами до адаптивності, можливості розширення та інтеграції в сучасних виробничих системах.

Ключові аспекти, що визначають переваги PLCnext, зводяться до наступного:

Відкрита структура та архітектура яка PLCnext заснована на ядрі операційної системи Linux, що надає можливість інтегрувати програмне забезпечення з

відкритим кодом і пристосовувати систему під конкретні потреби виробництва. Наприклад, можна використовувати спеціалізовані бібліотеки для обробки даних з датчиків або алгоритми машинного навчання для оптимізації процесів, написані сторонніми розробниками.

Підтримка мов програмування високого рівня, таких як C++, C# і MATLAB Simulink, поряд із традиційними мовами стандарту IEC 61131-3, забезпечує гнучкість для інженерів-програмістів, які мають різний рівень підготовки та досвід. Це дозволяє використовувати вже наявні напрацювання і розробляти складні алгоритми керування, адаптовані під специфічні завдання. Наприклад, можна створити програму на C++ для швидкої обробки даних або скористатися графічним середовищем Simulink для моделювання системи керування.

PLCnext підтримує інтеграцію з хмарними платформами (наприклад, Proficloud), що дозволяє збирати й аналізувати інформацію в режимі реального часу, навіть якщо обладнання розташоване віддалено. Це може бути інформація про температуру, потік рідини, тиск та інші важливі для виробництва показники. Аналіз цих даних може допомогти виявити закономірності, на основі яких можна, наприклад, прогнозувати необхідність технічного обслуговування обладнання або оптимізувати технологічний процес.

Підтримка протоколів зв'язку, таких як OPC UA та MQTT, гарантує сумісність із сучасними системами промислового Інтернету речей (IIoT). Це означає, що PLCnext може легко обмінюватися даними з іншими пристроями та системами на виробництві, такими як датчики, виконавчі механізми, системи керування виробництвом (MES) та системи планування ресурсів підприємства (ERP). Завдяки цьому створюється єдина інформаційна інфраструктура, що дозволяє більш ефективно керувати всіма аспектами виробництва.

Контролери PLCnext Control, що працюють на основі операційної системи Linux, характеризуються здатністю працювати в режимі реального часу та відповідають високим стандартам у сфері безпеки, що є критично важливим для промислових систем. Це означає, що контролери можуть швидко і точно реагувати

на зміни в технологічному процесі, а також захищені від несанкціонованого доступу та кіберзагроз.

Інтегровані функції безпеки (наприклад, SIL або PLe) дозволяють розробляти системи керування, що відповідають вимогам безпеки для конкретного виробництва. Це особливо важливо для підприємств, де існує ризик виникнення аварійних ситуацій, які можуть завдати шкоди людям, обладнанню або навколишньому середовищу.

PLCnext Store надає доступ до готових програм, бібліотек і додаткових модулів, які можуть прискорити процес розробки. Наприклад, можна знайти готові рішення для керування певним типом обладнання або бібліотеки для обробки даних з певних датчиків.

Глобальна спільнота PLCnext Community пропонує ресурси, форуми та навчальні матеріали, що спрощує вирішення проблем і обмін досвідом між користувачами. Це дозволяє швидко отримати відповіді на запитання, знайти рішення для складних завдань і дізнатися про нові можливості платформи PLCnext. Спільнота об'єднує інженерів з різних країн і галузей промисловості, що робить її цінним джерелом знань і досвіду.

PLCnext - це вдалий вибір для створення системи автоматизації кристалізатора, оскільки він добре пристосовується до непростих завдань. Його відкрита структура дає можливість додавати власні алгоритми для регулювання потоку охолоджувальної води або температури. Підтримка технологій IoT дозволяє стежити за процесом в режимі реального часу.

Використання безкоштовного середовища розробки PLCnext Engineer допомагає зменшити витрати на програмне забезпечення. Комбінація стандарту IEC 61131-3 з мовами програмування високого рівня дозволяє реалізувати як звичайні, так і більш складні функції керування. Також, PLCnext - це надійне рішення, яке підтримує сучасні технології, такі як 5G і TSN. Це робить його перспективним варіантом для довгострокового проєкту автоматизації

кристалізатора. Він може забезпечити стабільну та гнучку роботу системи протягом багатьох років. PLCnext дає можливість точно налаштувати параметри кристалізації, що позитивно впливає на якість кінцевого продукту. Він також дозволяє збирати та аналізувати дані про процес, що може бути корисним для подальшого вдосконалення технології.

Загалом, PLCnext представляє собою збалансоване рішення, яке поєднує в собі гнучкість, надійність і економічність, що робить його привабливим вибором для автоматизації кристалізаторів.

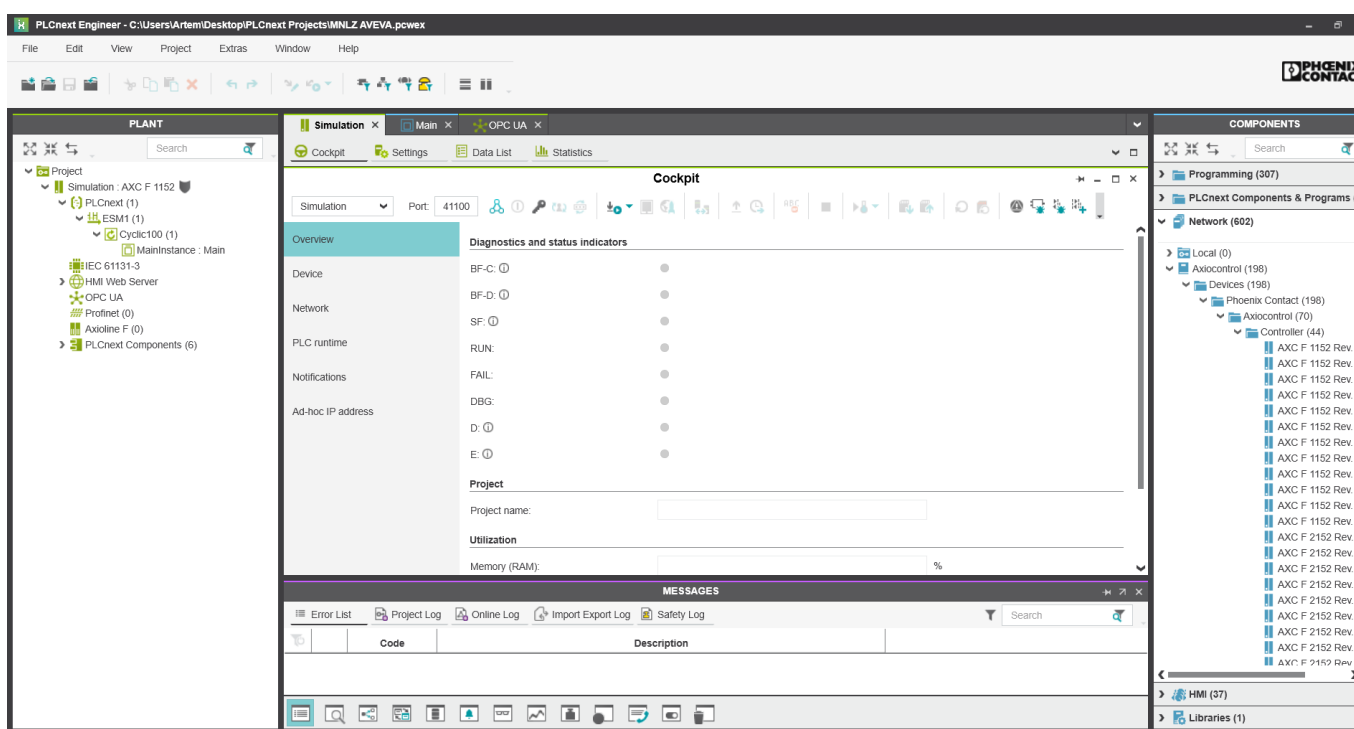


Рисунок. 2.2 - робоче вікно додатку PLCnext.

2.3. Розробка схеми мережних інформаційних потоків інтегрованої автоматизованої системи.

Розробка схеми мережних інформаційних потоків для інтегрованої автоматизованої системи, призначеної для моніторингу та візуалізації процесу кристалізації металу на машині безперервного лиття заготовок, є критично

важливим кроком у створенні кібер-фізичної системи. Ці мережеві інформаційні потоки визначають, як саме відбувається обмін даними між різними компонентами системи. Ці компоненти включають датчики, які збирають дані про процес, програмовані логічні контролери (PLC), які керують обладнанням, SCADA-сервер, який збирає та обробляє дані, та робочі станції, де оператори можуть спостерігати за процесом і вносити зміни.

Інформаційні потоки в системі структуровані за трирівневою моделлю, яка віддзеркалює її архітектуру. Кожен рівень має свої особливості обробки та передачі даних. Розглянемо кожен з них детальніше:

Рівень перший - рівень фізичних активів (Field Level): На цьому рівні відбувається збір первинної інформації безпосередньо з об'єктів управління. Датчики, що встановлені на обладнанні, фіксують необхідні показники (температуру, рівень тощо) та перетворюють їх у аналогові або цифрові сигнали. Ці сигнали передаються до програмованих логічних контролерів (PLC). Важливо відзначити, що точність і надійність датчиків мають прямий вплив на якість даних, що надходять до наступних рівнів системи. Тут PLC виступають в ролі агрегаторів даних. PLC збирають інформацію від численних датчиків, здійснюють її первинну обробку (фільтрацію, масштабування, перетворення одиниць вимірювання), а потім передають узагальнені дані на SCADA-сервер. Для передачі даних зазвичай використовується протокол OPC UA, який забезпечує стандартизований та безпечний обмін інформацією між різними пристроями. OPC UA надає можливість інтеграції обладнання від різних виробників в єдину систему, що спрощує підтримку та розширення інфраструктури.

PLC отримують команди управління від SCADA-сервера для виконавчих механізмів. Крім збору та передачі даних, PLC також виконують функції управління. SCADA-сервер відправляє команди управління на PLC, які, своєю чергою, керують виконавчими механізмами (наприклад, клапанами, насосами, двигунами). Це дозволяє автоматично регулювати технологічні процеси на основі

даних, що надходять від датчиків. Важливо, щоб команди управління були чіткими та однозначними, щоб уникнути помилок та аварійних ситуацій.

Рівень другий - рівень збору та обробки даних (Edge Level). На периферійному рівні, де відбувається безпосередній контакт з обладнанням та процесами, ключову роль відіграє SCADA-сервер, виконуючи збір, обробку та передачу даних.

Отримання даних від програмованих логічних контролерів (PLC): SCADA-сервер встановлює з'єднання з PLC за допомогою мережі Ethernet. Цей протокол забезпечує швидку та надійну передачу даних, необхідну для моніторингу параметрів процесу в реальному часі. PLC, як правило, збирають інформацію з численних датчиків та пристроїв, що безпосередньо контролюють фізичний процес, наприклад, температуру, тиск, рівень рідини, швидкість обертання тощо. Отримані дані включають в себе не лише поточні значення, але й інформацію про статус обладнання, можливі аварійні сигнали та діагностичні дані.

Після отримання даних від PLC, SCADA-сервер виконує їх обробку. Це може включати в себе фільтрацію, масштабування, перетворення одиниць вимірювання та розрахунок похідних параметрів. Оброблена інформація потім передається на робочі станції операторів, де вона візуалізується за допомогою графічних інтерфейсів.

Ці інтерфейси дозволяють операторам бачити поточний стан процесу, відстежувати зміни параметрів, ідентифікувати потенційні проблеми та приймати обґрунтовані рішення. Візуалізація може включати в себе тренди, гістограми, графіки, а також мнемосхеми, що відображають розташування обладнання та потоки матеріалів.

SCADA-сервер не тільки отримує дані, але й здатний відправляти команди управління назад до PLC. Ці команди можуть бути ініційовані операторами з робочих станцій або ж згенеровані автоматично на основі заданих алгоритмів. Команди управління використовуються для регулювання параметрів процесу,

запуску або зупинки обладнання, зміни режимів роботи та виконання інших дій, необхідних для підтримки стабільної та ефективної роботи системи. Передача команд також здійснюється через Ethernet, забезпечуючи швидку та надійну взаємодію між SCADA-сервером та PLC.

Рівень третій - рівень управління та візуалізації (Control and Visualization Level). На рівні управління та візуалізації в системах SCADA, взаємодія людини з машиною (HMI) відіграє ключову роль у забезпеченні операторів необхідними інструментами для моніторингу та контролю над виробничими процесами. На цьому рівні, робочі станції, що є невід'ємною частиною інфраструктури, отримують оновлені дані безпосередньо від SCADA-сервера. Цей потік даних включає широкий спектр інформації про стан обладнання, поточні значення параметрів процесу, а також історичні дані про продуктивність.

Інтерфейс HMI, який розгорнуто на цих робочих станціях, спеціально розроблено для представлення даних у зручному та зрозумілому для оператора форматі. Він відображає інтерактивні панелі управління, графіки, діаграми та інші візуальні елементи, що дозволяють операторам швидко оцінювати поточний стан системи та виявляти потенційні відхилення або проблеми.

Крім того, HMI надає операторам можливість безпосередньо взаємодіяти з системою, відправляючи команди управління до SCADA-сервера. Коли оператор відправляє команду через HMI, вона передається до SCADA-сервера, який, у свою чергу, ініціює відповідні дії в контрольованому процесі. Це забезпечує замкнутий цикл управління, де оператори мають можливість в реальному часі впливати на хід виробничих процесів, забезпечуючи їх ефективність та безпеку.

Для забезпечення стабільної та надійної роботи рівня управління та візуалізації, важливо враховувати ряд факторів, таких як: оптимізація мережевої інфраструктури для забезпечення низької затримки передачі даних, розробка інтуїтивно зрозумілих та зручних у використанні інтерфейсів HMI, а також впровадження механізмів контролю доступу та авторизації для запобігання несанкціонованому доступу до системи. Крім того, регулярне навчання операторів

та проведення тренінгів з використання НМІ є критично важливим для забезпечення їх компетентності та здатності ефективно реагувати на будь-які нештатні ситуації.

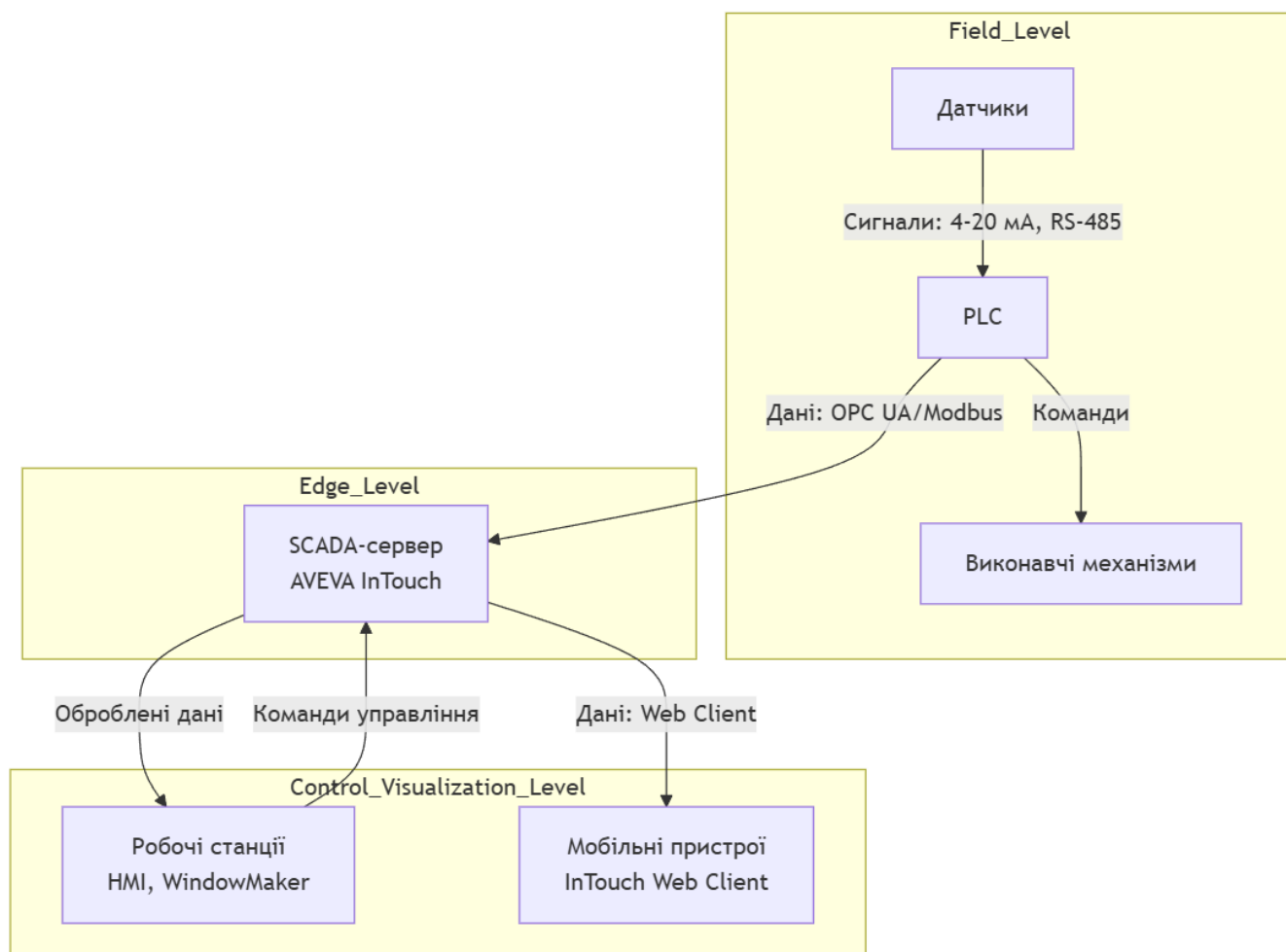


Рисунок. 2.3 - схема мережевих інформаційних потоків

Представлена схема організації потоків інформації в автоматизованій системі, призначеній для безперервного лиття заготовок (МНЛЗ), має на меті забезпечити стабільний та дієвий обмін даними між різними елементами системи. Це включає в себе датчики, програмовані логічні контролери (PLC), SCADA-сервер, операторські станції та системи управління більш високого рівня.

В основі цієї схеми лежить застосування програмного забезпечення AVEVA InTouch SCADA, що дозволяє візуалізувати та контролювати виробничі процеси. Для стандартизації обміну даними використовуються протоколи OPC UA, які забезпечують сумісність між обладнанням різних виробників. Безпечна та надійна мережева інфраструктура є критично важливою для забезпечення безперебійної роботи системи.

Зазначені технології та підходи відповідають концепції Industry 4.0, яка передбачає інтеграцію інформаційних технологій у виробничі процеси. Це дозволяє здійснювати моніторинг, управління та аналіз процесу кристалізації в реальному часі, що сприяє підвищенню якості продукції та оптимізації виробництва.

Важливою особливістю запропонованої схеми є її гнучкість та можливість адаптації до конкретних потреб металургійного виробництва. Її архітектура дозволяє масштабувати систему, додаючи нові датчики, контролери та робочі станції без значних змін у конфігурації. Безпека даних забезпечується використанням сучасних методів шифрування та контролю доступу.

Таким чином, ця схема організації інформаційних потоків представляє собою комплексну систему, яка дозволяє ефективно керувати процесом безперервного лиття заготовок, підвищувати якість продукції та забезпечувати відповідність вимогам сучасного металургійного виробництва.

2.4. Програмно-технічна реалізація проєктованих компонентів інтелектуального виробництва та засобів їх інтеграції.

Реалізація системи керування кристалізацією металу починається з проєкту в PLCnext Engineer, де програмується логіка, налаштовуються змінні та інтегрується контролер PLCnext у мережу підприємства.

У проєкті створюються основні змінні, що показують ключові параметри процесу.

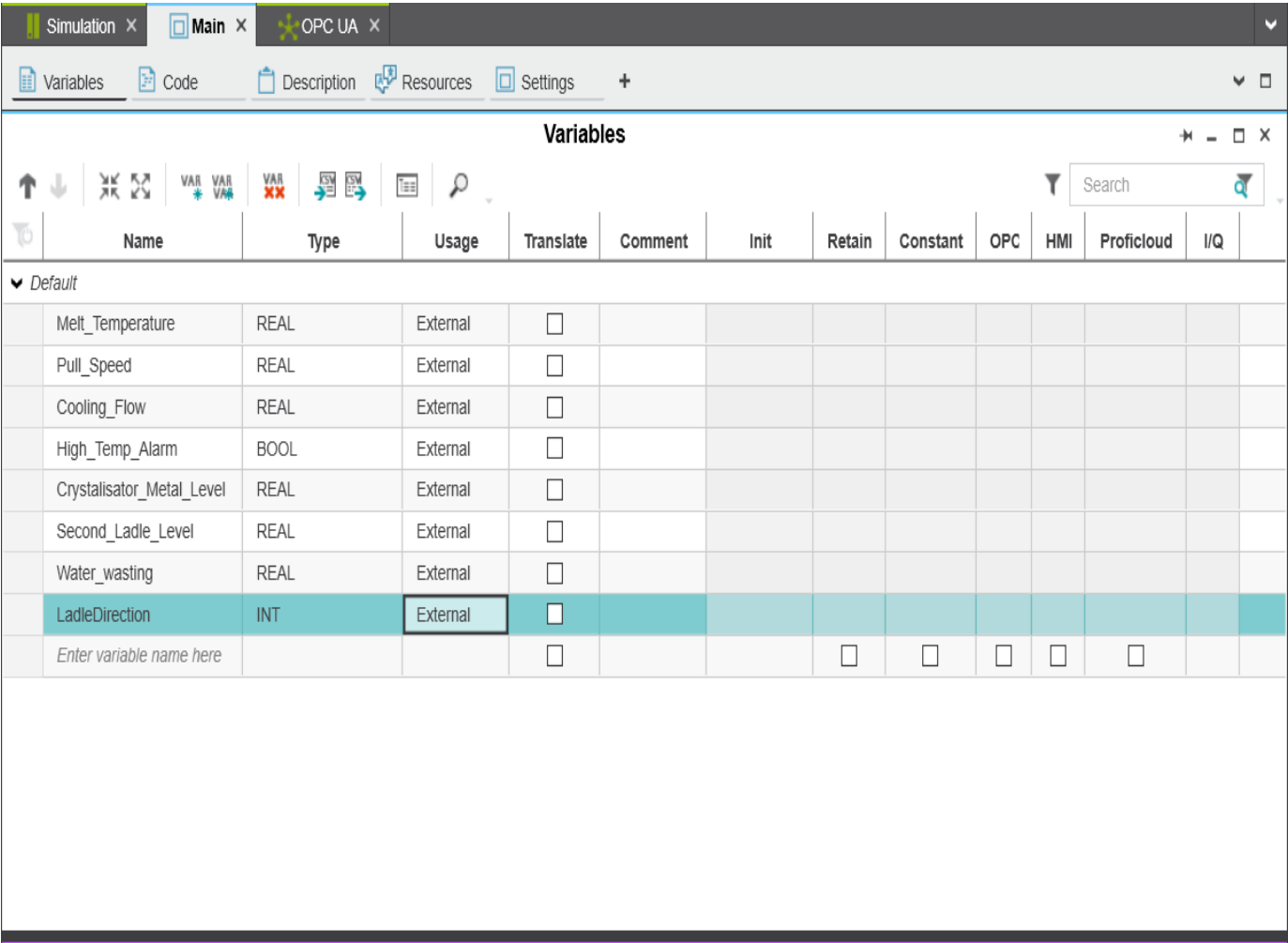


Рисунок. 2.4 - створені змінні

Таблиця 2.1- Змінні та їх значення.

Назва	Тип	Значення
Melt_Temperature	REAL	Температура плавління
High_Temp_Alarm	BOOL	Активація тривоги
Second_Ladle_Level	REAL	Рівень металу в ковші
Crystallisator_Metal_Level	REAL	Рівень металу в кристалізаторі
Water_wasting	REAL	Витрата води на охолодження

LadleDirection	INT	Допоміжна змінна для зміни рівнів металу
Pull_Speed	REAL	Швидкість витягування заготовок
Cooling_Flow	REAL	Охолодження кристалізатора

Для моделювання безперервної розливки сталі (МНЛЗ) застосовувалася мова Structured Text (ST). ST - це потужний засіб програмування в галузі автоматизації, що зумовлено її подібністю до мов високого рівня. Ця особливість робить простішим створення комплексної логіки та алгоритмів.

ST характеризується чіткою структурою коду, підтримкою різних типів змінних, можливістю застосування умовних операторів, циклів і функцій. Завдяки цьому вона добре підходить для реалізації складних обчислень. Мова ST вирізняється компактністю й читабельністю. Вона легко поєднується з іншими мовами стандарту IEC 61131-3, підтримує модульність і можливість повторного застосування коду. Прямолінійне виконання коду забезпечує високу продуктивність.

Мова ST (Structured Text), що є частиною стандарту IEC 61131-3, набула широкого вжитку в промисловій автоматизації. Вона є текстовою мовою програмування, що робить її схожою на Pascal або C. Це дає змогу інженерам і програмістам, знайомим з цими мовами, відносно легко її опанувати.

Однією з основних переваг ST є її здатність створювати складні алгоритми керування. На відміну від графічних мов програмування, таких як Ladder Diagram (LD) або Function Block Diagram (FBD), ST дозволяє більш компактно та виразно записувати математичні обчислення, логічні операції та алгоритми обробки даних. Це особливо корисно у випадках, коли потрібна висока точність і швидкість

обробки інформації, як, наприклад, у системах керування рухом, регулюванні температури або контролі якості.

Структура коду в ST сприяє кращій організації та підтримці програмного забезпечення. Чіткий синтаксис і можливість використання коментарів полегшують розуміння коду іншими розробниками. Підтримка різних типів даних, таких як цілі числа, дійсні числа, рядки та булеві значення, дозволяє працювати з різними типами сигналів і даних, що надходять від датчиків і виконавчих механізмів.

Умовні оператори (IF-THEN-ELSE) дозволяють створювати гнучкі алгоритми керування, які можуть адаптуватися до різних умов роботи МНЛЗ. Можливість створення функцій і процедур дозволяє розбивати складні завдання на менші, легші для розуміння та повторного використання, модулі. Це зменшує обсяг коду, робить його більш читабельним і полегшує процес налагодження. Щодо інтеграції з іншими мовами стандарту IEC 61131-3, ST може використовуватися разом з LD, FBD, Sequential Function Chart (SFC) і Instruction List (IL). Це дозволяє розробникам вибирати ту мову, яка найкраще підходить для конкретного завдання. Наприклад, LD може використовуватися для реалізації простих логічних операцій, а ST - для більш складних обчислень.

Висока продуктивність ST зумовлена тим, що вона є компільованою мовою. Це означає, що код ST перетворюється на машинний код, який може виконуватися безпосередньо процесором контролера. Прямолінійне виконання коду мінімізує затримки та забезпечує швидку реакцію системи керування на зміни вхідних сигналів.

У випадку моделювання МНЛЗ, ST може використовуватися для реалізації алгоритмів керування швидкістю витягування заготовки, регулювання подачі води для охолодження, контролю температури та інших параметрів процесу. Вона дозволяє створювати моделі, які точно відображають динаміку МНЛЗ і дозволяють інженерам проводити експерименти з різними стратегіями керування без ризику пошкодження обладнання.

Таким чином, використання ST для моделювання МНЛЗ є обґрунтованим вибором, оскільки вона поєднує в собі потужність, гнучкість і продуктивність, необхідні для розв'язання складних задач промислової автоматизації.

```

1
2
3  (* Симуляція температури *)
4  IF Melt_Temperature < 1700.0 THEN
5      Melt_Temperature := Melt_Temperature + 0.5;
6  ELSE
7      Melt_Temperature := 1400.0;
8  END_IF;
9
10 (* Тривога перевищення температури *)
11 IF Melt_Temperature > 1500.0 THEN
12     High_Temp_Alarm := TRUE;
13 ELSE
14     High_Temp_Alarm := FALSE;
15 END_IF;
16
17
18 IF LadleDirection = 0 THEN
19     LadleDirection := 1;
20 END_IF;
21
22
23 Second_Ladle_Level := Second_Ladle_Level + (LadleDirection * 2.0);
24 Crystallisator_Metal_Level := Crystallisator_Metal_Level - (LadleDirection * 0.45);
25
26 (* Зміна рівнів металу *)
27 IF Second_Ladle_Level >= 800.0 THEN
28     Second_Ladle_Level := 800.0;
29     Crystallisator_Metal_Level := 0.0;
30     LadleDirection := -1;
31 ELSIF Second_Ladle_Level <= 0.0 THEN
32     Second_Ladle_Level := 0.0;
33     Crystallisator_Metal_Level := 180.0;
34     LadleDirection := 1;
35 END_IF;
36
37
38 Water_wasting := Water_wasting + 0.1;

```

Рисунок. 2.5 - створений код на мові ST

2.5. Розробка основних анімованих сторінок для системи диспетчерського контролю та керування/сервісів аналітики.

Розробка ключових анімованих сторінок для системи диспетчерського контролю здійснюється в програмному середовищі AVEVA Intouch SCADA HMI. В ході розробки було створено дві основні сторінки інтерфейсу панелей диспетчерського контролю, кожна з яких виконує свою роль у забезпеченні ефективного управління технологічним процесом.

Перша сторінка, названа Main, слугує центральною інформаційною панеллю для диспетчера. Її головним завданням є надання можливості ретельного моніторингу за станом технологічного процесу, відображаючи його найважливіші характеристики. Оператор може змінювати параметри процесу безпосередньо з панелі управління або через звичайне вікно браузера. Така гнучкість дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни в технологічному процесі, що є критично важливим для підтримки його стабільності та ефективності. На сторінці Main відображаються різноманітні дані, такі як поточні значення технологічних параметрів, графіки їх зміни в часі, а також інформація про стан обладнання та наявність аварійних ситуацій.

Для безперервного спостереження за критично важливим параметром – температурою плавлення металу - було застосовано прямокутний індикатор. Цей індикатор показує поточне значення температури в текстовому форматі, дозволяючи оператору швидко оцінювати стан процесу. Безпосередньо біля індикатора температури розміщено індикатор тривоги. Він негайно сповіщає про вихід температури за встановлені межі. Це дозволяє оператору швидко вжити заходів для запобігання аварійним ситуаціям і забезпечення стабільності технологічного процесу. Важливо, що індикація тривоги може бути реалізована в різних формах, таких як зміна кольору, анімація або звуковий сигнал, щоб гарантовано привернути увагу оператора в разі виникнення нештатної ситуації. Використання різних форм індикації дозволяє адаптувати систему до індивідуальних потреб оператора та покращити сприйняття інформації в умовах інтенсивного робочого процесу.



Рисунок. 2.6 - індикатори температури металу та тривоги

Індикатор температури обладнання візуально відображає поточний температурний режим за допомогою трьох різних кольорових сигналів, що надає оператору миттєву інформацію про стан нагріву. Коли температура опускається нижче рекомендованого діапазону, індикатор загоряється синім, вказуючи на необхідність підвищення температури для забезпечення оптимальної продуктивності процесу. Якщо ж температура знаходиться в межах оптимального діапазону, необхідного для обробки металу, індикатор світиться жовтим, підтверджуючи, що умови відповідають вимогам технологічного процесу, а датчик тривоги залишається в стані спокою, сигналізуючи про відсутність відхилень. У

випадку досягнення критичної температури, яка перевищує допустимі межі, індикатор змінює колір на червоний, одночасно активуючи датчик тривоги, який також починає світитися червоним, попереджаючи про можливі ризики термічного пошкодження обладнання або зміни властивостей матеріалу. Ця система дає змогу оперативно реагувати на температурні зміни, запобігаючи аварійним ситуаціям та підтримуючи стабільність виробничого процесу.

Objecttype: Rectangle Prev Link Next Link OK Cancel

Fill Color -> Analog Expression

Expression: Melt_Temperature OK Cancel

BreakPoints: 0 1400 1500 1501 1600 1700 1800 1900 2000 Clear

Color: [Blue] [Blue] [Yellow] [Red] [Red] [Red] [Red] [Red] [Red] [Red]

Рисунок. 2.7 - налаштування індикатора температури металу

Реалізація моніторингу швидкості витягування заготовок відбувається за допомогою спеціалізованого інтерфейсного елементу, що має прямокутну форму. На цьому елементі в текстовому форматі відображається інформація про поточну швидкість процесу. Для забезпечення оперативного керування швидкістю технологічного процесу, поблизу розташовані графічні елементи, виконані у вигляді кнопок. Ці кнопки надають оператору можливість безпосередньо регулювати швидкість вилучення, адаптуючи її до поточних вимог виробництва або специфічних характеристик оброблюваних матеріалів. Такий підхід

забезпечує не тільки візуальний контроль, але й оперативне втручання в процес для забезпечення оптимальних показників продуктивності та якості. Можливість швидкого коригування швидкості дозволяє уникнути потенційних затримок або дефектів, пов'язаних із невідповідністю швидкості заданим параметрам технологічного процесу. Розміщення елементів керування у безпосередній близькості до дисплею з інформацією про швидкість сприяє інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу та знижує ймовірність помилок у роботі оператора.

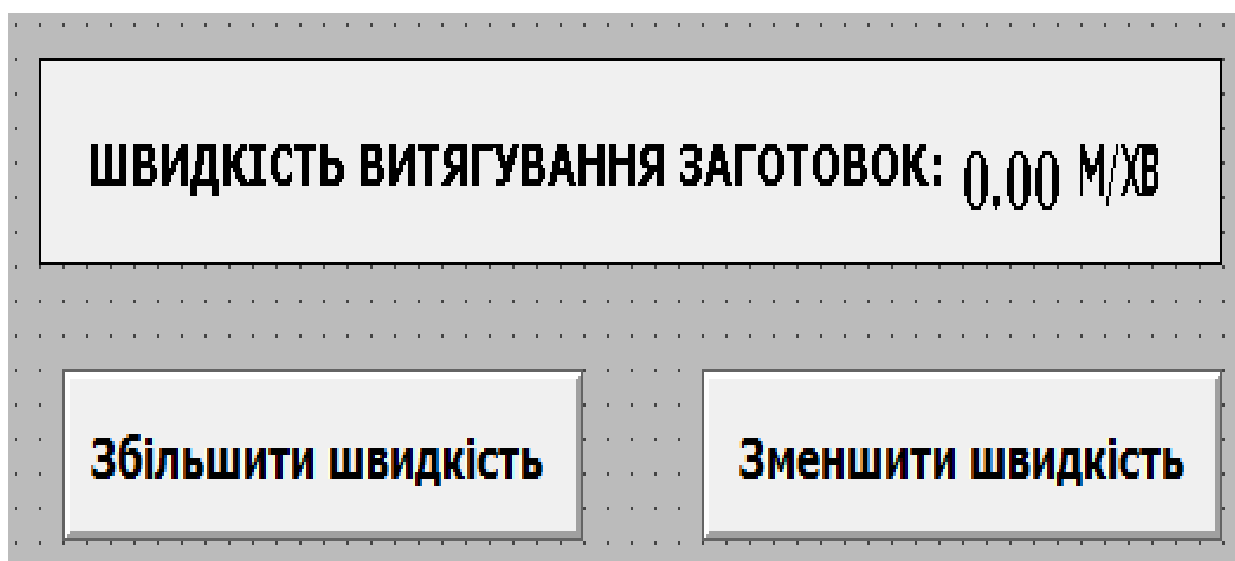


Рисунок. 2.8 - індикатор швидкості витягування заготовок та кнопки керування

Аналогічним чином створено індикатор температури води в кристалізаторі з можливістю керування.

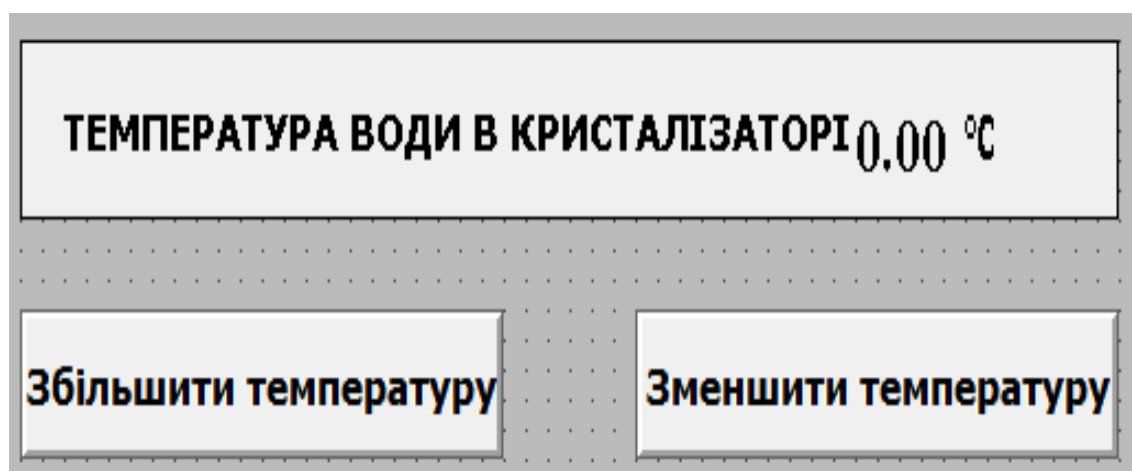


Рисунок. 2.9 - індикатор температури води в кристалізатор та кнопки керування

Візуалізація рівня металу у проміжному ковші є критично важливою складовою процесу безперервного лиття сталі. Цей параметр, що постійно змінюється, відіграє вирішальну роль у забезпеченні стабільності та якості виробленої сталі. Для відображення цього динамічного процесу використовується графічний індикатор, відомий як Meter.

Функціонування цього індикатора полягає у відображенні поточного рівня металу в ковші у реальному часі. Індикатор Meter динамічно змінює свої показники, реагуючи на коливання об'єму металу. Збільшення рівня металу відображається відповідним зростанням показників індикатора, в той час як зменшення рівня призводить до їхнього падіння. Швидкість та плавність зміни показників індикатора безпосередньо залежать від темпу надходження та витрати металу з ковша.

Така візуалізація дозволяє операторам процесу лиття безперервно контролювати рівень металу та оперативно реагувати на будь-які відхилення від заданих параметрів. Чітке та зрозуміле відображення інформації допомагає підтримувати стабільність процесу, уникати переливання або оголення футеровки ковша, що прямо впливає на якість готової продукції та безпеку виробництва. Ефективна візуалізація рівня металу у ковші, таким чином, є невід'ємною частиною сучасних систем автоматизованого управління процесом лиття сталі. Залежно від конкретної системи, індикатор може мати різні форми, кольори та додаткові функції, але його основна мета залишається незмінною - забезпечення операторам чіткої та своєчасної інформації про поточний стан процесу. Крім того, архівні дані про зміни рівня металу, зафіксовані індикатором, можуть бути використані для аналізу та оптимізації технологічних параметрів лиття.

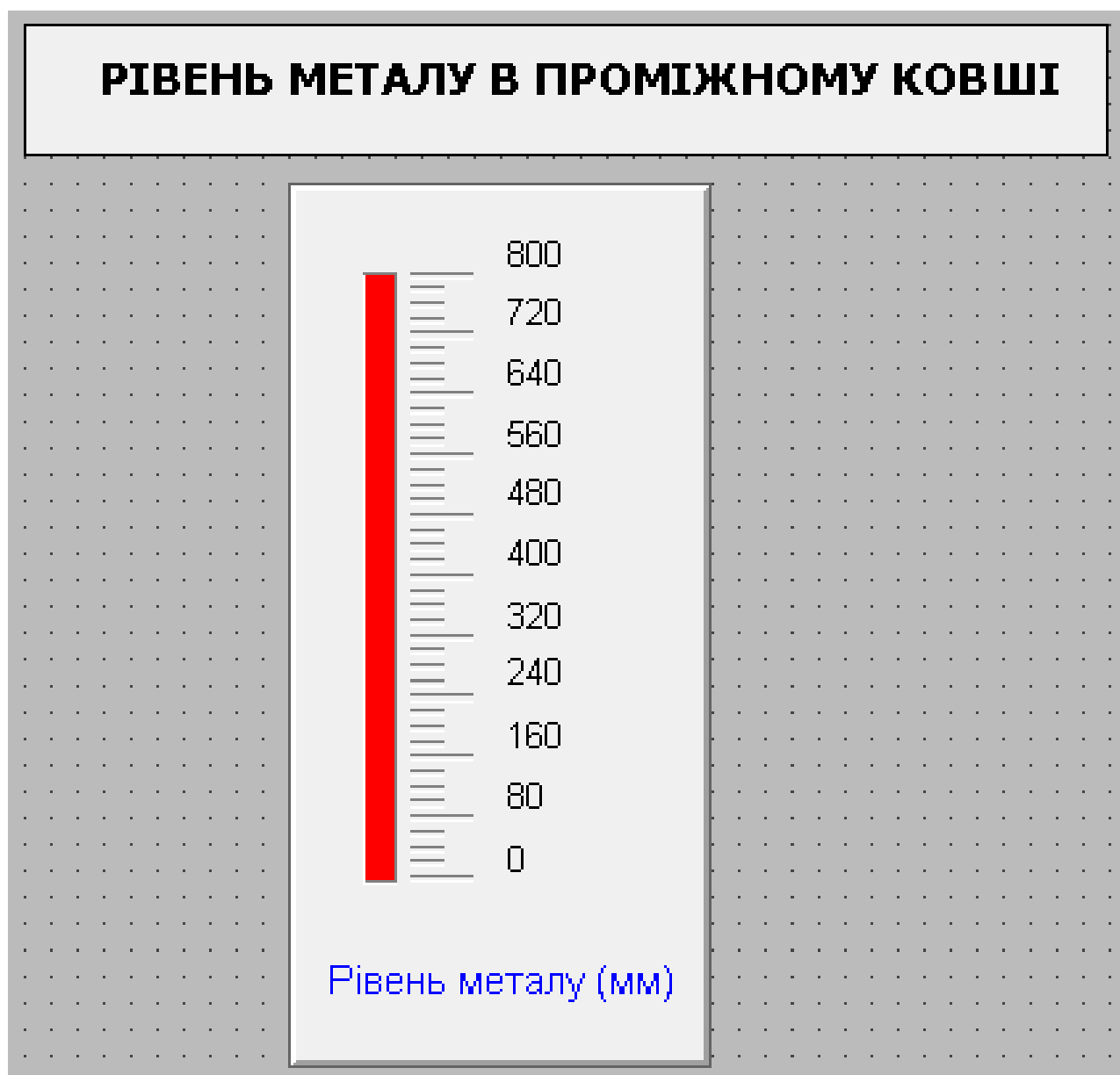


Рисунок. 2.10 - індикатор рівня металу в проміжному ковші

Meter Wizard

Expression:

OK Cancel

Meter/Gauge Face

Label:

Fill Color: Text Color:

Meter Range

Minimum:

Maximum:

Tick Marks

Major Divisions:

Minor Divisions:

Tick Labels

Display a Label for Every: Major Division(s)

Text Color: Decimal Places:

Рисунок 2.11 -налаштування індикатора рівня металу в проміжному ковші

Аналогічним чином створено індикатор рівня металу в кристалізаторі, рівні пов'язані між собою тому коли наповнюється кристалізатор кількість металу в ковші зменшується та навпаки.



Рисунок 2.12 - індикатор рівня металу в кристалізаторі

Кількість витраченої води для кристалізатора також має свій індикатор:

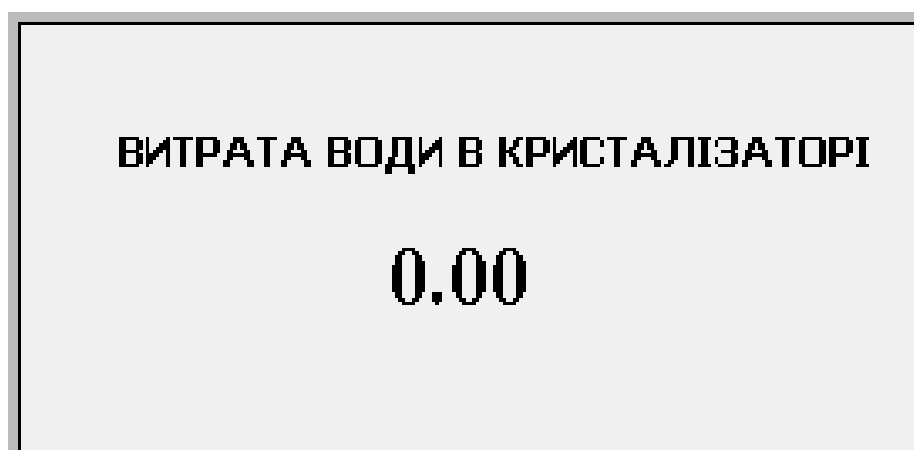


Рисунок 2.13 - індикатор витрати води в кристалізаторі

Створений НМІ також має сторінку Trends з графіками зміни характеристик технологічного процесу за часом, для того щоб перейти до неї потрібно натиснути створену кнопку “Перейти до графіків”.

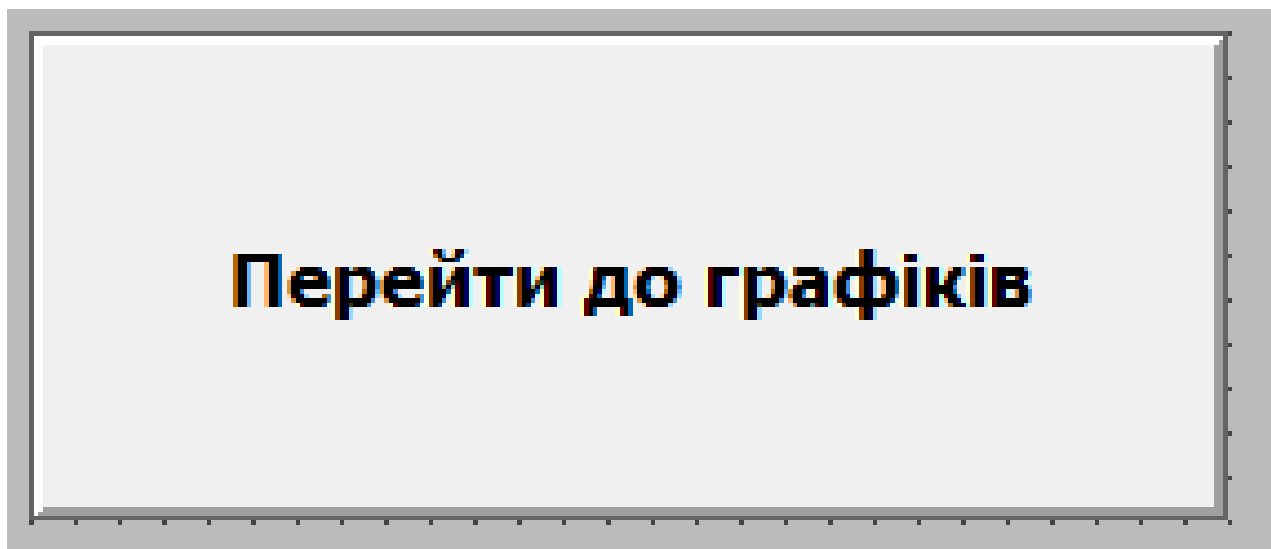


Рисунок 2.14 - кнопка “Перейти до графіків”

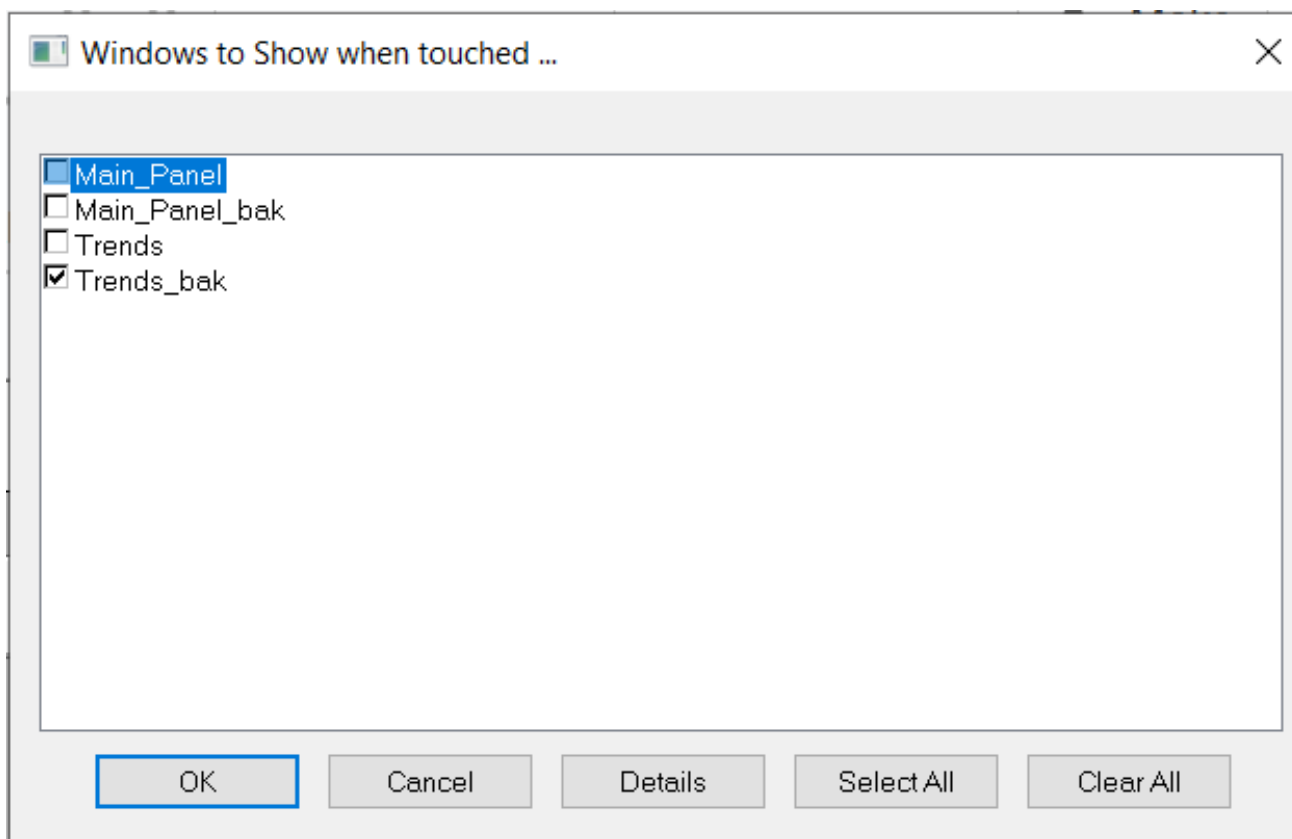


Рисунок 2.15 - налаштування кнопки “Перейти до графіків”

Натиснувши кнопку оператор потрапляє у вікно Trends:



Рисунок 2.16 - налаштування кнопки “Перейти до графіків”

Для повернення до сторінки Main оператору потрібно натиснути кнопку “Повернутися на головну”.

Під час роботи система має наступний вигляд:



Рисунок 2.17 - вигляд НМІ сторінки Main під час роботи системи

Також є можливість розгорнути НМІ сторінки в веб-браузері, таким чином оператор зможе слідкувати та керувати технологічним процесом майже в будь-якому місці.

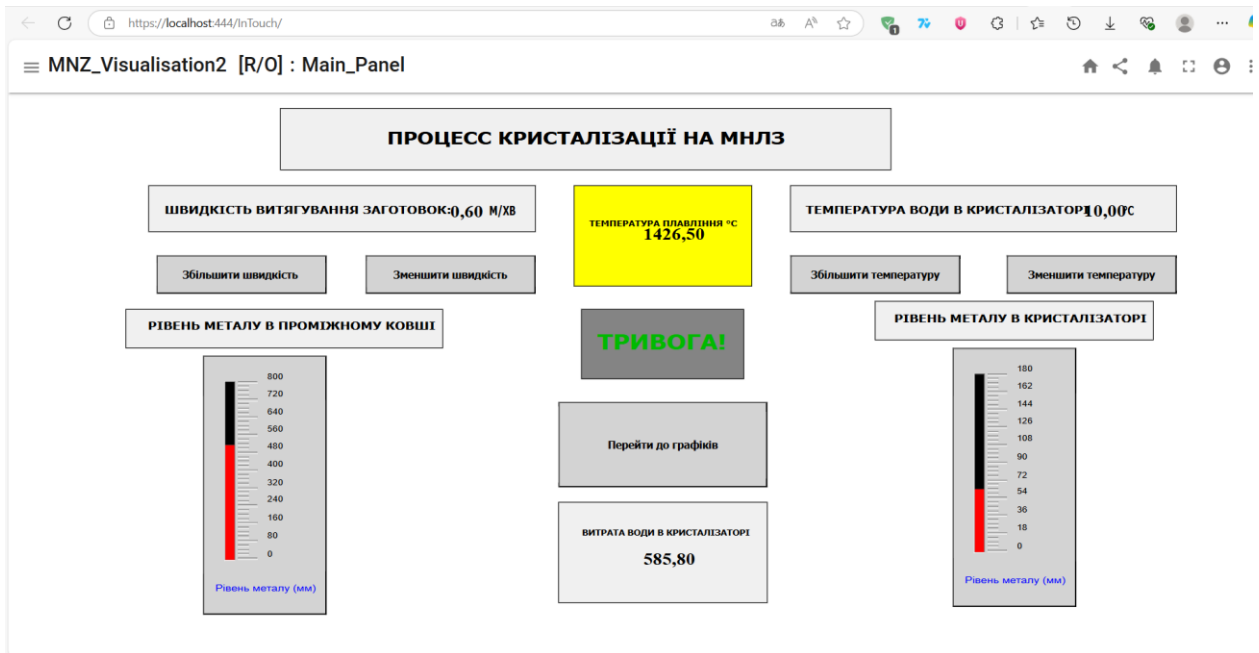


Рисунок 2.18 - розгортання НМІ сторінки в браузері

ВИСНОВКИ

У магістерській дипломній роботі розроблено систему автоматизованого управління МНЛЗ, яка базується на поєднанні двох технологій: програмного забезпечення AVEVA InTouch HMI та платформи PLCnext від Phoenix Contact. Щоб забезпечити надійний обмін інформацією між цими компонентами, використовується стандарт OPC UA.

Система управління розроблена з урахуванням ключових параметрів, важливих для процесу кристалізації. Зокрема, вона контролює температуру розплавленого металу, обсяг охолоджувальної води, швидкість витягування заготовки, а також рівень металу як в самому кристалізаторі, так і в проміжній ємності. Це дає можливість моделювати процес та вносити необхідні корективи для його стабілізації.

Платформа PLCnext пропонує ряд переваг завдяки своїй відкритій архітектурі, яка дозволяє паралельно виконувати різні програми. OPC UA, з іншого боку, гарантує безпечну та надійну передачу даних між контролером і інтерфейсом HMI. Для написання програм в PLCnext було обрано мову Structured Text, що дозволило розробити складні алгоритми управління, які є читабельними та забезпечують швидке виконання.

Для перевірки працездатності розробленої системи було проведено імітаційне тестування в середовищі WindowViewer. Під час тестування особливу увагу приділяв коректній обробці змін рівнів та сигналів тривоги, пов'язаних з температурними показниками.

Результати роботи показують, що розроблена система має хороші перспективи для промислового застосування. Вона забезпечує спостереження за процесом у реальному часі, надає можливість віддаленого моніторингу, а також може бути інтегрована з хмарними сервісами для детального аналізу даних. Це, в свою чергу, відкриває шлях до гнучкого налаштування параметрів процесу

кристалізації у відповідності до мінливих умов виробництва, що може привести до поліпшення якості кінцевої продукції та зменшення виробничих витрат.

Крім того, система дозволяє збирати та аналізувати великі обсяги даних про процес кристалізації. Ці дані можуть бути використані для виявлення закономірностей, прогнозування можливих проблем та подальшого вдосконалення процесу. Наприклад, можна виявляти залежність між зміною температури охолоджувальної води та якістю кристалу, або між швидкістю витягування заготовки та виникненням дефектів. Це дозволить більш точно керувати процесом та отримувати продукцію з заданими властивостями.

Розроблена система також має потенціал для оптимізації споживання енергії. Аналізуючи дані про енергоспоживання різних компонентів системи, можна виявити неефективні ділянки та вжити заходів для зменшення енергетичних витрат. Наприклад, можна оптимізувати роботу насосів, які подають охолоджувальну воду, або налаштувати систему на автоматичне зниження температури в періоди, коли виробництво не здійснюється.

Важливим аспектом є також можливість інтеграції розробленої системи з іншими системами управління виробництвом. Наприклад, її можна підключити до системи планування ресурсів підприємства (ERP) або до системи управління якістю. Це дозволить забезпечити більш тісну координацію між різними етапами виробничого процесу та підвищити його загальну ефективність.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності системи, зокрема на розробку алгоритмів адаптивного управління, які б автоматично налаштовували параметри процесу кристалізації у відповідності до змінних умов виробництва. Також цікавим напрямком є використання методів машинного навчання для прогнозування якості продукції на основі даних про поточні параметри процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Парусов Е. В., Сичков О. Б., Чуйко І. М., Сагура Л. В., Сівак А. І. Вплив технологічних параметрів розливання і кристалізації сталі на якісні показники безперервнолитої заготовки. Наукові праці ВНТУ. Вінниця : ВНТУ, 2016. № 2. С. 1–10.
2. Маринич І. А., Сердюк О. Ю. Математична модель теплового стану заготовок для вдосконалення керування процесом кристалізації металу на машині безперервного лиття заготовок. Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Сімферополь : ТНУ, 2021. Т. 32 (71), Ч. 1, № 2. С. 15–22.
3. Юдіна С. А., Крюковська О. А. Сучасний стан виробництва якісної сталі на МНЛЗ в умовах ВАТ “ДМКД”. Процеси лиття. Дніпро : НМетАУ, 2021. № 35. С. 25–32.
4. Нурадінов А. С., Ноговіцин О. В., Нурадінов І. А., Зубеніна К. А. Інноваційні шляхи керування процесом формування кристалічної будови металевих сплавів. Металургія та машинобудування : зб. наук. праць. Харків : НМетАУ, 2022. № 71. С. 45–53.
5. Нурадінов А. С., Нарівський А. В., Нурадінов І. А., Курпас В. І., Ясинська О. О. Процеси структуроутворення в сталевих злитках при теплосилових діях на метал. Науковий вісник металургії. Запоріжжя : ЗДІА, 2023. № 37. С. 12–20.
6. Щерецький В. О. Особливості застосування нанорозмірних частинок для модифікування процесів кристалізації металів. Металургія та новітні технології : зб. наук. праць. Київ : НАН України, 2024. № 30. С. 33–40.
7. Макуров С. Л., Єфременко Б. В. Метод дослідження процесу затвердіння безперервнолитої заготовки у кристалізаторі МНЛЗ. Металургія та лиття. Дніпро : НМетАУ, 2015. № 10. С. 5–12.

8. Босий М. Спрощена математична модель теплофізичного процесу кристалізації металу. Вісник Кременчуцького національного університету. Кременчук : КрНУ, 2022. № 4 (11). С. 10–16.
9. Романюк О. Н., Романюк О. В., Круподьорова Л. М., Майданюк В. П. Моделі для побудови систем візуалізації реального часу. Інформаційні технології – 2022 : зб. тез IX Всеукр. наук.-практ. конф. молодих науковців. Київ : Київський університет імені Бориса Грінченка, 2022. С. 193.
10. Мартиненко І. В. Фізичне моделювання асиметричного витікання металу у кристалізатор слябової машини безперервного лиття заготовок : монографія. Львів : Новий Світ, 2019. 410 с.
11. Zhang J., Li W. Numerical Modeling of Continuous Casting Process for Steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 214. P. 201–209.
12. Wang Y., Zhang T., Liu H. Simulation of Heat Transfer and Solidification in Continuous Casting of Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46. P. 1234–1243.
13. Kumar S., Patel R. Advanced Modeling Techniques in Continuous Casting of Steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016. Vol. 23. P. 85–93.
14. Chen L., Zhang H. Integrated Process Modeling of Continuous Casting and Cooling of Steel Slabs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 115. P. 521–532.
15. Liu X., Wu C., Zhang R. Optimization of Continuous Casting Process by Numerical Simulation. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 31. P. 112–120.
16. Thomas B. G., Zhang L. Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting. *Applied Mathematical Modelling*. 2021. Vol. 25, No. 10. P. 825–846.
17. Hibbeler L. C., Thomas B. G. Thermo-mechanical Model of Steel Shell Behavior in the Continuous Casting Mold, Applied to Formation of Longitudinal Facial Cracks. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015. Vol. 44, No. 3. P. 593–605.

18. Cho S. M., Kim S. H., Yoon J. K. Numerical Analysis of Heat Transfer and Solidification in a Continuous Casting Mold with Mold Flux. *ISIJ International*. 2018. Vol. 50, No. 9. P. 1230–1238.
19. Mills K. C., Fox A. B., Li Z., Thackray R. P. Performance and Properties of Mould Fluxes. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015. Vol. 32, No. 1. P. 26–34.
20. Louhenkilpi S., Nyrhila O., Vaarno J. A Coupled Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer and Solidification in Continuous Casting. *Steel Research International*. 2019. Vol. 70, No. 6. P. 247–253.
21. Спосіб контролю процесу безперервного лиття сталі : пат. 95200 С2 Україна : МПК В22D 11/00. № u201400789 ; заявл. 27.01.2016 ; опубл. 12.08.2016, Бюл. № 15.
22. Спосіб запобігання утворенню тріщин у заготовці при безперервному литті : пат. 110573 С2 Україна : МПК В22D 11/04. № u201503456 ; заявл. 19.05.2015 ; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7.
23. Пристрій для покращення теплообміну в кристалізаторі МНЛЗ : пат. 123456 С2 Україна : МПК В22D 11/06. № u201603278 ; заявл. 22.06.2016 ; опубл. 10.12.2017, Бюл. № 23.
24. Система регулювання подачі охолоджувальної рідини у кристалізатор : пат. 125356U Україна : МПК В22D 11/22. № u201704512 ; заявл. 02.11.2017 ; опубл. 14.05.2018, Бюл. № 9.
25. Спосіб підвищення однорідності кристалізації металу в МНЛЗ : пат. 142035U Україна : МПК В22D 11/10. № u201905634 ; заявл. 30.07.2019 ; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 4.
26. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50с.

27. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
28. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
29. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)
30. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).